



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS, QUÍMICAS E FARMACÊUTICAS
CAMPUS DIADEMA



CELSO OVIEDO DA SILVA LOPES

OSCILAÇÕES ACÚSTICAS DE BÁRIONS E SUA IMPORTÂNCIA

DIADEMA

2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS, QUÍMICAS E FARMACÊUTICAS
CAMPUS DIADEMA



CELSO OVIEDO DA SILVA LOPES

OSCILAÇÕES ACÚSTICAS DE BÁRIONS E SUA IMPORTÂNCIA

Trabalho de conclusão de curso apresentado como exigência parcial para obtenção do certificado de conclusão do curso de **Especialização em Teoria da Relatividade**, ao Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo - Campus Diadema.

DIADEMA

2020



Oviedo da Silva Lopes, Celso

Oscilações Acústicas de Bárions e Sua Importância / Celso

Oviedo da Silva Lopes. - - Diadema, 2020.

62 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Teoria da Relatividade) – Universidade Federal de São Paulo – Campus Diadema, 2020.

Orientadora: Profa. Dra. Rose Clívia Santos

1.Sistema Internacional de Unidade. 2.UEPS. I.Título



Nome: Celso Oviedo da Silva Lopes

Título: Oscilações Acústicas de Bárions e sua importância

Trabalho de conclusão de curso apresentado como exigência parcial para obtenção do certificado de conclusão do curso de **Especialização em Teoria da Relatividade**, ao Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas da Universidade Federal de São Paulo - Campus Diadema.

Orientadora: Profa. Dra. Rose Clívia Santos

Data da Entrega para a Comissão do TCC:

09/ 10/ 2020

Profa. Dra. Rose Clívia Santos

Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP

Orientadora

Celso Oviedo da Silva Lopes

Candidato



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS, QUÍMICAS E FARMACÊUTICAS
CAMPUS DIADEMA



“A minha filha Camilla, que pela sua companhia, apoio, amor e amizade, é meu presente nesta vida.”



AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Julio e Carmen - a quem dedico este trabalho, que foram e sempre serão meus heróis na vida. Serei eternamente grato pelo amor, dedicação e apoio incondicional que sempre recebi deles, encorajando-me a realizar os meus sonhos.

A minha orientadora Prof^a Dr^a Rose Clívia Santos, pelas orientações, conselhos e disponibilidade que teve comigo desde o início deste trabalho.

A todos os meus professores, sem exceção, pois todos de alguma forma contribuíram para a minha formação pessoal e acadêmica. Em particular, à Prof^a Dr^a Nadja Magalhães e ao Prof. Dr. Marcio Avellar.

Aos amigos que fiz durante a especialização na Unifesp, que compartilharam comigo momentos de aprendizados, dúvidas, angústias (provas) e muitas conquistas.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS, QUÍMICAS E FARMACÊUTICAS
CAMPUS DIADEMA



*“Construímos muros demais e pontes
de menos.”*

Autor. Isaac Newton



RESUMO

Embora frequentemente formulada em termos de desvendar a natureza da energia escura, a cosmologia atual também pode ser vista como uma revolução nas medições de distância. Pela primeira vez, começamos a sondar com precisão a história da expansão do cosmos muito além do universo local, ou seja, em redshifts intermediários e altos ($z > 1$). Na evolução da escala de distâncias, um papel essencial foi desempenhado pelas supernovas do tipo Ia (SNe Ia) que possibilitaram uma mudança paradigmática na cosmologia moderna: a descoberta da expansão acelerada do universo. Junto com essa descoberta, outros fenômenos também são relevantes para a compreensão da composição e evolução do universo observado. Além das anisotropias de fundo cósmico de microondas (CMB), atenção especial tem sido dada às chamadas oscilações acústicas dos bárions (BAO). O fenômeno BAO envolve medidas da distribuição espacial das galáxias para determinar a taxa de crescimento das estruturas cósmicas que ocorrem no universo em expansão. Os padrões formados pela distribuição das galáxias contêm informações sobre como a estrutura cósmica se expandiu a partir de pequenas flutuações iniciais. Este tipo de agrupamento define uma "régua padrão" de origem estatística entre galáxias e outros objetos celestes e pode ser usado para reconstruir a expansão do universo.

Neste TCC, iremos nos concentrar no BAO obtido de um conjunto de galáxias observadas pelo Sloan Digital Sky Survey (SDSS). A detecção de um pico na função de correlação radial indica evidências indiretas da existência das oscilações acústicas dos bárions, ou seja, flutuações na densidade da matéria visível. O nosso principal objetivo é fazer uma revisão da física envolvida nas oscilações acústicas dos bárions, com particular ênfase nos principais projetos em curso visando a medição do BAO longitudinal e transversal.

Palavras-chave: Distâncias em Cosmologia. BAO. Energia Escura. Matéria Escura.



ABSTRACT

Although often formulated in terms of unraveling the nature of dark energy, current cosmology can also be viewed as a revolution in distance measurements. For the first time, we are beginning to probe with precision the history of the expansion of the cosmos far beyond the local universe, that is, in intermediate and high redshifts ($z > 1$). In the evolution of the distance scale, an essential role was played by type Ia (SNe Ia) supernovae that enabled a paradigmatic change in modern cosmology: the discovery of the accelerated expansion of the universe. Along with this discovery, other phenomena are also relevant for understanding the observed universe's composition and evolution. In addition to the anisotropies of cosmic microwave background (CMB), special attention has been given to the so-called baryons acoustic oscillations (BAO). The BAO phenomenon involves measures of galaxies' spatial distribution to determine the rate of growth of cosmic structures occurring in the expanding universe. The patterns formed by the distribution of galaxies contain information about how the cosmic structure expanded from small initial fluctuations. This type of grouping defines a "standard ruler" of statistical origin between galaxies and other celestial objects and can be used to reconstruct the universe's expansion.

In this TCC, we will focus on the BAO obtained from a set of galaxies observed by the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). The detection of a peak in the radial correlation function indicates indirect evidence for the existence of acoustic oscillations of baryons, that is, fluctuations in the density of visible matter. Our main objective is to review the physics involved in the baryons' acoustic oscillations, with particular emphasis on the main projects in progress aiming at the measurement of longitudinal and transversal BAO.

Keywords: Cosmological Distances. BAO. Dark Matter. Dark Energy.



LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: Composição do universo | 15 |
| Figura 2: Parâmetro de curvatura | 26 |
| Figura 3: Função de correlação de galáxias | 37 |
| Figura 4: Distância radial e transversal do BAO | 40 |
| Figura 5: O mapa do Universo do SDSS | 41 |
| Figura 6: Observatório Apache Point do SDSS | 43 |
| Figura 7: Função de correlação do SDSS-III BOSS..... | 46 |
| Figura 8: O mapa do céu visto pelo SDSS-III | 47 |
| Figura 9: Mapeamento do eBOSS | 50 |
| Figura 10: Telescópio Blanco no Chile | 51 |
| Figura 11: Distribuição angular e densidade projetada da amostra da galáxia vermelha DES-Y1 | 52 |
| Figura 12: Large Synoptic Survey Telescope | 53 |
| Figura 13: Telescópio Kitt Peak National Observatory Mayall..... | 55 |
| Figura 14: Protótipo do radiotelescópio BINGO | 56 |



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AGN** – Active Galactic Nuclei
- BAO** – Baryon Acoustic Oscillation
- BOSS** – Baryon Oscillation Spectroscopic Survey
- CMB** - Cosmic Microwave Background
- DES** – Dark Energy Survey
- DESI** – Dark Energy Spectroscopic Instrument
- eBOSS** – Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey
- J-PAS** – Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey
- Λ CDM** – Lambda Cold Dark Matter
- LRG** – Luminous Red Galaxies
- LSST** – Large Synoptic Survey Telescope
- MCP** – Modelo Cosmológico Padrão
- PROEC** – Pró-Reitoria de Extensão e Cultura
- RCF** – Radiação cósmica de fundo
- RSD** – Redshift Space Distortions
- SPIDERS** – SPectroscopic IDentification of ERosita Sources
- SEGUE** – Sloan Extension for Galactic Under Exploration
- TCC** – Trabalho de Conclusão de Curso
- TDSS** – Time-Domain Spectroscopic Survey
- TGR** – Teoria da Relatividade Geral
- WL** – Weak Lens



SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| Sumário | 12 |
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 Redshift cosmológico..... | 19 |
| 1.2 Dinâmicas do Universo em expansão | 21 |
| 1.3 Modelo Λ CDM | 27 |
| 2. OSCILAÇÕES ACÚSTICAS DE BÁRIONS | 29 |
| 2.1 A Física do BAO | 30 |
| 2.1.1 Função de Correlação e Espectro de Potência | 33 |
| 2.2 BAO e a Energia Escura | 37 |
| 2.3 Distancias | 38 |
| 3. OBSERVAÇÕES | 41 |
| 4. CONCLUSÃO | 57 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 60 |



1. INTRODUÇÃO

Um dos desafios da cosmologia atual é entender a expansão acelerada do universo. Segundo o Modelo Cosmológico Padrão (MCP), uma provável responsável é a energia escura.

Entre os diversos meios de medir os efeitos da energia escura na evolução cósmica, as oscilações acústicas de bárions (em inglês, Baryonic Acoustic Oscillations - BAO) têm se mostrado muito eficientes.

Aqui revisamos os aspectos teóricos, observacionais e estatísticos do BAO e examinamos o impacto que o BAO terá sobre nosso entendimento da energia escura, a distância e a escala de expansão.

Para entendermos a evolução do conhecimento nesta área revisitaremos o desenvolvimento histórico da Cosmologia. Em Fevereiro de 1917, Albert Einstein publica o artigo intitulado *“Kosmologische Betrachtungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie”* (Considerações Cosmológicas sobre a Teoria da Relatividade Geral). Há quem diga que Einstein estendeu seus estudos a todo o universo baseado na ideia de Ernst Mach relacionada à relatividade da inércia. A ideia de Mach diz que a inércia de um corpo é um efeito devido à presença de todas as outras massas no universo. Einstein pensou ter resolvido a questão da inércia na perspectiva de Mach com a introdução de um modelo no qual o universo é estático e espacialmente fechado (FOLSING, 1997).

Para construir um modelo estático, Einstein introduziu em suas equações de campo uma constante denominada Constante Cosmológica (Λ), a qual equilibra a atração da matéria no universo com uma força antigravitacional dessa matéria, homogeneamente distribuída. Pouco tempo depois, De Sitter, usando o modelo de um universo hiperbólico, mostra que as equações de Einstein não obedeciam ao princípio de Mach, necessariamente.

Em 1922, Alexander Friedmann percebeu que soluções não estáticas das equações de campo de Einstein, deduzidas no quadro dos modelos relativísticos do universo, preveem a existência da expansão desse universo. Assumindo uma



curvatura espacial positiva para o universo, Friedmann derivou duas equações diferenciais conectando a evolução temporal do universo à densidade da matéria e à constante cosmológica (modelos de Friedmann).

Em 1927, Georges Lemaître descobriu uma família de soluções para as equações relativísticas de campo de Einstein que descreviam não um universo estático, mas um universo em expansão (tal como Alexander Friedmann). Ciente das observações astronômicas da recessão das nebulosas espirais e das evidências emergentes das enormes distâncias das nebulosas, Lemaître viu as observações como evidências de um universo em expansão.

Em 1929, com o surgimento de novos telescópios, no início do século XX, após uma série de observações de Andrômeda, Edwin Hubble publicou seu relatório definitivo de que o desvio para o vermelho (redshift) da luz proveniente de galáxias distantes é proporcional à sua distância, num artigo intitulado “*A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*”, na Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America”. Hubble observou a existência de uma relação linear entre o desvio para o vermelho e a distância, isto é, $cz = H_0 d$, onde H_0 é a chamada constante de Hubble, relação válida para pequenas distâncias ou pequenos redshifts.

Hubble apresentou uma clara evidência de que o Universo se expande e os modelos expansionistas de Friedmann e Lemaître foram confirmados.

À luz da Relatividade Geral, uma teoria métrica da gravitação, as galáxias se afastam umas das outras devido à própria expansão do espaço.

Os desenvolvimentos teóricos e tecnológicos permitiram a construção de um modelo denominado Modelo Cosmológico Padrão (MCP) que melhor se ajusta a um conjunto considerável de observáveis. Esse modelo, baseado na Teoria da Relatividade Geral (TGR) de Einstein, em união com os postulados da física fundamental, permite-nos compreender a evolução do universo desde os primeiros segundos até a época atual, aproximadamente 13,8 bilhões de anos depois.

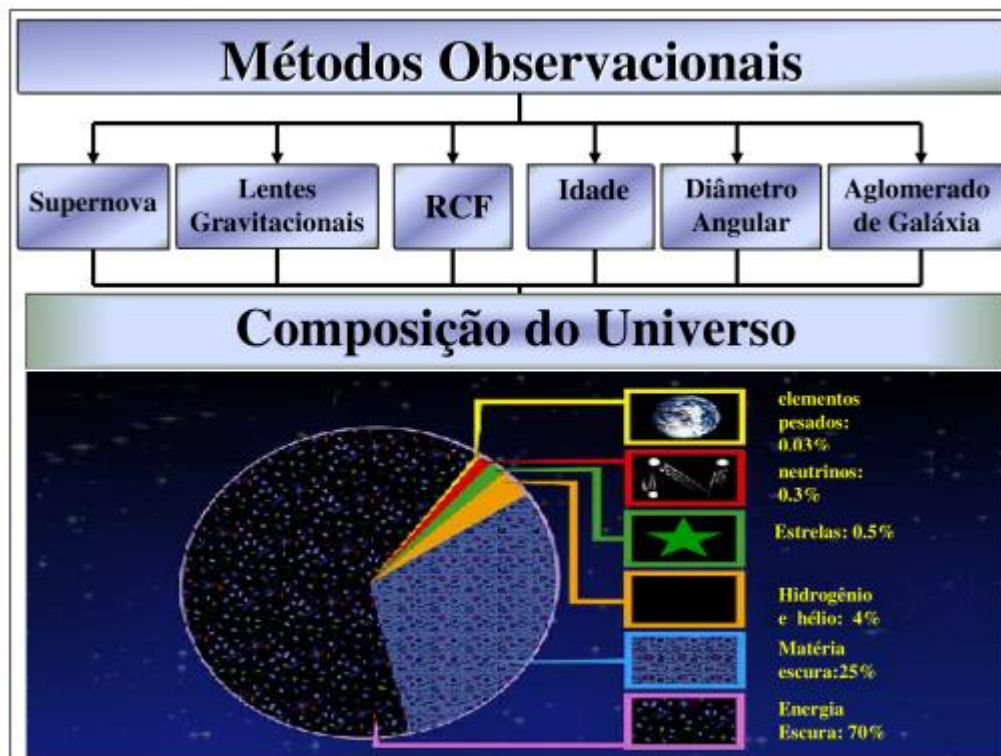
Observações astronômicas baseadas em Supernovas do tipo Ia realizadas em 1998, indicaram que a expansão do universo está acelerada (RIESS, 1998).

Como a gravidade é uma força atrativa, acreditava-se numa expansão desacelerada.

Porém, há uma questão fundamental para a qual não se tem ainda uma resposta conclusiva: o que provoca essa aceleração do universo?

A figura 1 ilustra a Composição do Universo

Figura 1- Composição do universo



Fonte: Santos, R. C. 2007

Figura 1: Composição do universo. Essa composição é entendida através da análise separada ou conjunta dos testes cosmológicos mencionados na imagem (ilustração publicada em (SANTOS, 2007)).

Em 2011, Saul Perlmutter, Adam Riess e Brian Schmidt receberam o prêmio Nobel de física por suas observações que mostraram como a expansão do Universo está acelerando.

Suas conclusões foram baseadas na análise das supernovas Tipo Ia - explosões termonucleares que marcam a morte de algumas estrelas - captadas pelo telescópio espacial Hubble e por telescópios terrestres.



Isto levou à aceitação generalizada da ideia de que o Universo é dominado por uma substância misteriosa que, por ser desconhecida e não ter sido ainda detectada recebeu o nome de energia escura - a energia escura é o que estaria acelerando a expansão do Universo.

A natureza da energia escura é evidenciada pelos dados atuais da radiação cósmica de fundo (RCF) (DE BERNARDIS, 2000), da estrutura em grande escala, das supernovas tipo Ia (RIESS, 2004), entre outros.

A existência dessas componentes não pode ser verificada diretamente das observações e somente através de suas interações gravitacionais com a matéria visível, é que temos evidências disso. Em particular, a energia escura está uniformemente distribuída, exerce pressão negativa e, portanto, atua de forma repulsiva. Um dos candidatos mais aceitos pela comunidade científica é Constante Cosmológica (Λ), a qual é interpretada como sendo a energia de vácuo de todos os campos quânticos preenchendo o cosmos.

Modelos alternativos de energia escura indicam uma possibilidade de modificação da relatividade geral, que poderia funcionar de forma diferente em escalas astronômicas, ou até mesmo a necessidade de um campo físico ainda mais amplo e não conhecido.

Em outros cenários é possível alterar a relatividade geral de forma ainda mais extrema, em que a aceleração cósmica é a manifestação da existência de uma ou de várias dimensões espaciais extras tal como prevista pelas teorias de cordas e de membranas (SILK, 1968) (BOND e EFSTATHIOU, 1984).

A distribuição das galáxias e aglomerados de galáxias contém várias informações sobre a evolução do universo como o comportamento da matéria e energia escura. Assim, levantamentos astronômicos em larga escala têm como objetivo principal o mapeamento de um grande número desses objetos. As características impressas no mapa das galáxias nos auxiliam nos estudos sobre os mecanismos que geraram as flutuações primordiais na densidade da matéria, como essas flutuações evoluem, qual a taxa com que as estruturas se formam e se existe alguma escala preferencial na sua distribuição. Perturbações de densidade linear permitem prever estatisticamente a abundância e a distribuição das estruturas



cósmicas. Os mecanismos necessários para crescimento de estruturas em grande escala não somente nos dizem como a matéria se organiza para formar galáxias e aglomerados como também nos ajuda a entender como o universo e suas componentes evoluem.

Utilizando uma teoria da expansão linear do universo, os estágios primordiais da evolução das estruturas cósmicas, quando as perturbações na densidade são muito menores do que a unidade, podem ser estudados. Já nos estágios mais avançados, quando as perturbações na densidade são da ordem ou maiores do que a unidade, podem ser estudados através de simulações numéricas computacionais.

É dessa forma que podemos avaliar o desenvolvimento das estruturas desde as perturbações iniciais até as estruturas maiores, gravitacionalmente ligadas, e compará-las às observações.

Para que as estruturas cósmicas que observamos existam, a densidade média do universo precisa sofrer algumas perturbações necessárias para que as estruturas cresçam através da atração gravitacional.

Essas perturbações se originaram nos instantes iniciais do universo, numa fase acelerada, conhecida como Era da Inflação. Segundo o MCP, ainda no plasma primordial, antes do desacoplamento dos fótons e elétrons, as flutuações na densidade de energia eram extremamente pequenas, da ordem de 10^{-5} . Em razão das altas temperaturas naquela época, as regiões ligeiramente mais densas começaram a atrair gravitacionalmente bárions e matéria escura, formando poços de potencial gravitacional. Nesses poços o fluido elétron-próton era comprimido e os fótons, aquecidos, produzindo pressão no sentido contrário ao da atração gravitacional. A alternância entre a pressão dos fótons e a ação gravitacional produziu ondas que se propagaram esfericamente pelo plasma à partir desses pontos centrais de excesso de densidade.

Essas ondas são as Oscilações Acústicas de Bárions (OAB, mais conhecidas por sua sigla em inglês BAO, Baryon Acoustic Oscillations, a qual iremos adotar neste TCC) produzidas pela competição entre a instabilidade gravitacional e a pressão de radiação no plasma primordial e que teriam deixado uma assinatura na



radiação cósmica de fundo (RCF) e na distribuição de matéria (SILK, 1968) (BOND e EFSTATHIOU, 1984) (HOLTZMAN, 1989).

Em meados dos anos 80, com o estudo feito pelos modelos adiabáticos de matéria escura fria, as previsões para detecção das BAO indicavam assinaturas menos significativas na distribuição de matéria total e os resultados impressos na matéria bariônica foram analisados principalmente na RCF.

Os primeiros indícios de BAO na distribuição de galáxias surgiram em 1998 através de uma pequena aglomeração observada em torno de $100 \text{ h}^{-1}\text{Mpc}$ (EISENSTEIN, 1998).

A partir dessa constatação, houve um interesse maior para se detectar as BAO e percebeu-se que seria necessário um maior volume dos dados observacionais. Em 1998, após a divulgação de uma base de dados robusta, fornecida pelo Sloan Digital Sky Survey (SDSS) e 2-degree Field Galaxy Redshift Survey (2dF) (EISENSTEIN, 2005) (COLE, 2005), foi possível obter uma assinatura acústica num grupo de galáxias vermelhas luminosas (em inglês LRG, Luminous Red Galaxies).

O SDSS e o 2dFGRS trouxeram um enorme conjunto de dados sobre galáxias no universo local, até então, nunca visto antes. Novos levantamentos como o Projeto BINGO (BAO from Integrated Neutral Gas Observations), J-PAS (Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey) e outros vão ampliar ainda mais o volume mapeado e aprimorar a estatística e as informações das observações.

A ferramenta estatística que possibilita o cálculo da probabilidade de encontrar pares de galáxias separados por uma distância específica é conhecida como função de correlação.

No contexto cosmológico, a função de correlação de dois pontos é definida como a ferramenta estatística que possibilita o cálculo da probabilidade de se encontrar dois pares de galáxias a uma determinada distância, e essa distancia é dada em termos de distância comóvel, ou seja, as distribuições de matéria não alteram suas coordenadas espaciais ao longo da expansão o Universo. Estas são



apenas escalonadas, através de um fator de escala, a cada instante que o Universo se expande.

A vantagem que BAO apresenta em relação a outros tipos de observações (como SNe Ia e outros que envolvem fenômenos complexos e pouco entendidos) é que os valores da distância angular e do parâmetro de Hubble são obtidos de maneira quase que completamente linear.

Assim, neste trabalho discutiremos as mais novas aplicações das BAOs para compreender e restringir as propriedades da energia escura, e conhecer um pouco mais sobre a sua natureza.

Este TCC foi dividido em quatro capítulos. Primeiramente, fizemos uma breve discussão sobre o modelo cosmológico padrão e apresentamos a teoria de perturbação que descreve a formação das estruturas e as oscilações acústicas bariônicas. No segundo capítulo, apresentamos as características das oscilações acústicas bariônicas (BAO) e os métodos estatísticos que quantificam as perturbações. No terceiro capítulo, introduzimos os principais levantamentos envolvendo a detecção da escala acústica. Por fim, apresentamos as nossas considerações finais.

1.1 Redshift cosmológico

Como já mencionado, em 1920, medindo a velocidade radial de galáxias Edwin Hubble observou que elas estão se afastando umas das outras e da Via Láctea. Ele concluiu que a velocidade radial v com que uma galáxia se afasta da Via Láctea (chamada velocidade de recessão) é diretamente proporcional à sua distância d , expressando esta relação com uma lei, denominada Lei de Hubble (1929):

$$v = H_0 d \quad (1)$$

A constante H_0 chamada constante de Hubble corresponde ao parâmetro de Hubble $H(t)$ medido hoje, ou seja, $H_0 = H(t_0)$ com t_0 sendo um tempo de

referência. A expansão, pelo princípio cosmológico, ocorre de forma homogênea e isotrópica, assim é possível escrever a relação:

$$r(t) = a(t)r(t_0) \quad (2)$$

Onde $r(t)$ é a distância entre um determinado par de galáxias, $r(t_0)$ é constante para este par e $a(t)$ é o fator de escala de expansão universal.

A velocidade de recessão de uma galáxia é dada pela derivada temporal de $r(t)$.

Assim, temos

$$v(t) = \dot{r}(t) = r(t_0)\dot{a}(t) \equiv H(t)r(t) \quad (3)$$

E o parâmetro de Hubble $H(t)$ (WEINBERG, 2008) pode ser escrito como

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \quad (4)$$

A expansão modifica o comprimento de onda λ da radiação eletromagnética emitida pelos objetos astronômicos observados. Isto se traduz num desvio para o vermelho (redshift) z , do espectro intrínseco do objeto que é definido como:

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \quad (5)$$

Onde λ_0 é o comprimento de onda observado e se assumirmos que a radiação foi emitida num tempo arbitrário t , o fator de escala também permite relacionar essas grandezas como segue:

$$\frac{a_0}{a(t)} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad (6)$$

E em seguida temos que:

$$z = \frac{a_0}{a(t)} - 1 \quad (7)$$

1.2 Dinâmicas do Universo em expansão

O Modelo Cosmológico Padrão (MCP) baseia-se no princípio cosmológico, segundo a qual o Universo é isotrópico e homogêneo em grandes escalas. Observações da distribuição de galáxias sugerem que essa hipótese seja válida em escalas $\gtrsim 100h^{-1}\text{Mpc}$ e em escalas angulares $\gtrsim 10'$. Outras observações, tais como da isotropia nas distribuições de temperatura da RCFM, de hidrogênio neutro e da distribuição de explosões de raios γ também apoiam a validade desse princípio.

Friedmann, em 1922, e Lemaître, em 1927 mostraram que um universo em expansão pode ser explicado no contexto da Relatividade Geral. Uma consequência puramente cinemática de um Universo isotrópico e homogêneo em expansão, em coordenadas esféricas comóveis, é dada pelo elemento de linha na métrica quadridimensional de Friedmann-Robertson-Walker (FRW):

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right] \quad (8)$$

Onde: r , θ , ϕ são coordenadas esféricas adimensionais; $a(t)$ é o fator de escala e k é a constante de curvatura. Espaços homogêneos e isotrópicos de três dimensões podem ser fechados, abertos ou planos. As equações da TGR relacionam a curvatura do espaço-tempo com a distribuição de massa/energia presente nele. A inflação prevê que o universo é aproximadamente plano espacialmente. Observações com o satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) reforçaram a teoria de um universo plano. Já as observações do Planck Legacy em 2018 (AKRAMI, 2018), significativamente mais precisos, revelaram que o universo é “quase plano”, mas ainda é 4% mais curvado do que se pensava. Assim, para um universo plano K é zero.

A curvatura do espaço-tempo é dada pelo tensor de Einstein $G_{\mu\nu}$:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = G_{\mu\nu} \quad (9)$$

Com os índices μ e ν de valores de 0,1,2 e 3. O tensor $R_{\mu\nu}$ é chamado tensor de Ricci, formado a partir do tensor de curvatura de Riemann. O tensor $g_{\mu\nu}$ é o tensor da métrica do espaço-tempo e assume o papel do campo nas equações de campo de Einstein. O termo R é a curvatura escalar, um escalar associado ao tensor de Ricci e ao tensor da métrica. A curvatura escalar é igual ao traço do tensor de Ricci com relação ao tensor da métrica, em termos tensoriais. A curvatura escalar é também chamada de escalar de Ricci.

A matéria e energia das equações de Einstein são dadas pelo tensor de energia-momento $T_{\mu\nu}$. A equação de campo de Einstein compacta têm a forma:

$$T_{\mu\nu} 8\pi G = G_{\mu\nu} \quad (10)$$

Onde, G é a constante de gravitação universal.

Substituindo em (10) em (9):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (11)$$

Onde iremos considerar a assinatura $(+, -, -, -)$.

O tensor de Ricci é $R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} R^{\mu\nu} = g^{\mu}_{\nu} R^{\nu}_{\mu} = R^{\mu}_{\mu}$.

Para um fluido perfeito, o tensor energia-momento fica:

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p) u_{\mu} u_{\nu} - p g_{\mu\nu} \quad (12)$$

Onde, ρ é a densidade de energia, p a pressão do fluido, e os termos u^a e u^b são as quadrivelocidades, definidas como $u^a = dx^a / d\tau$, onde τ é o tempo próprio de um observador em movimento junto com o fluido, ou seja, medida por um observador comóvel.

De (8) e (11) e após algumas manipulações algébricas chegamos as equações de Friedmann nas seguintes formas:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3} \quad (13)$$

$$2\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G\rho}{3}(\rho + 3p)u_\mu u_\nu - pg_{\mu\nu} \quad (14)$$

Combinando essas duas equações, obtemos uma equação da aceleração do universo, que não depende da sua curvatura, ou seja, $\ddot{a} > 0$ implica em $\rho + 3p < 0$.

Assim, chegamos a equação denominada Equação da Continuidade para fluidos perfeitos. Ela determina a conservação de energia.

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G\rho}{3}(\rho + 3p) \quad (15)$$

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p) = 0 \quad (16)$$

Os fluidos de interesse à Cosmologia podem ser descritos pela equação de estado $p = w\rho$, sendo w uma constante. Substituindo na Equação de Continuidade, teremos:

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{a_0}{a}\right)^{3(w+1)} \quad (17)$$

Sendo a_0 e ρ_0 o fator de escala e a densidade no tempo atual, respectivamente. Pelo MCP, no universo inicial, a radiação ($w = \frac{1}{3}$, $\rho_r \propto a^{-4}$) era dominante.

Posteriormente, o universo foi dominado por matéria não-relativística, onde a pressão do fluido pode ser desprezada quando comparada a densidade de energia, isto é, $w = 0$ e $\rho_m \propto a^{-3}$. E atualmente, o universo é dito ser dominado pela energia do vácuo (constante cosmológica), ou seja, $w = -1$ e $\rho_\Lambda = \frac{\Lambda}{8\pi G}$.

A geometria do universo é definida pelo conteúdo de matéria que nele existe, e isto ocorre através da contribuição de diversas componentes de densidade ρ_i , parametrizadas por Ω_i . Essas componentes são: fótons, neutrinos, matéria bariônica, matéria escura, curvatura e energia escura.

Considerado o universo plano ($K=0$), pela equação (13), podemos definir ρ_{crit} como uma densidade energia crítica que é a densidade necessária para o universo ser plano.

$$\rho_{crit} = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (18)$$

Logo, para componente (i), podemos escrever os seus parâmetros de densidades como:

$$\Omega_i \equiv \frac{\rho}{\rho_{crit}} = \frac{8\pi G \rho_i}{3H^2} \quad (19)$$

Assim, é possível estimar suas densidades de energia, a seguir:

- **Fótons**

$$\rho_\gamma = \frac{\pi^2}{15} T^4 \quad (20)$$

$$\Omega_\gamma = \frac{\rho_\gamma}{\rho_{crit}} = \frac{2,47 \cdot 10^{-5}}{h^2 a^4} \quad (21)$$

Onde, T é a temperatura da radiação cósmica de fundo numa dada época, h é o parâmetro de Hubble hoje, normalizado em termos de $100 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$.

- **Neutrinos**

Considerando temperatura dos neutrinos menor que a temperatura dos fótons, pois houve o desacoplamento dos neutrinos antes do início das reações de aniquilação entre elétrons e pósitrons e a massa do neutrino $m=0$, sua contribuição para a densidade de energia pode ser escrita como (DODELSON, 2003):

$$\Omega_v = \frac{1,68 \cdot 10^{-5}}{h^2 a^4} \quad (22)$$

- **Bárions**

$$\Omega_b = \frac{\rho_b}{\rho_{crit}} a^3 \quad (23)$$

- **Matéria Escura**

Como a densidade de matéria é diferente da densidade de matéria bariônica, estima-se haver mais algum outro tipo de matéria que compõe a matéria total. A essa matéria foi dado o nome de matéria escura, porque ela não interage com a radiação, assim, temos para a densidade de matéria total:

$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_{crit}} a^{-3} \quad (24)$$

Onde: $\Omega_m = \Omega_b + \Omega_{me} + \Omega_v$.

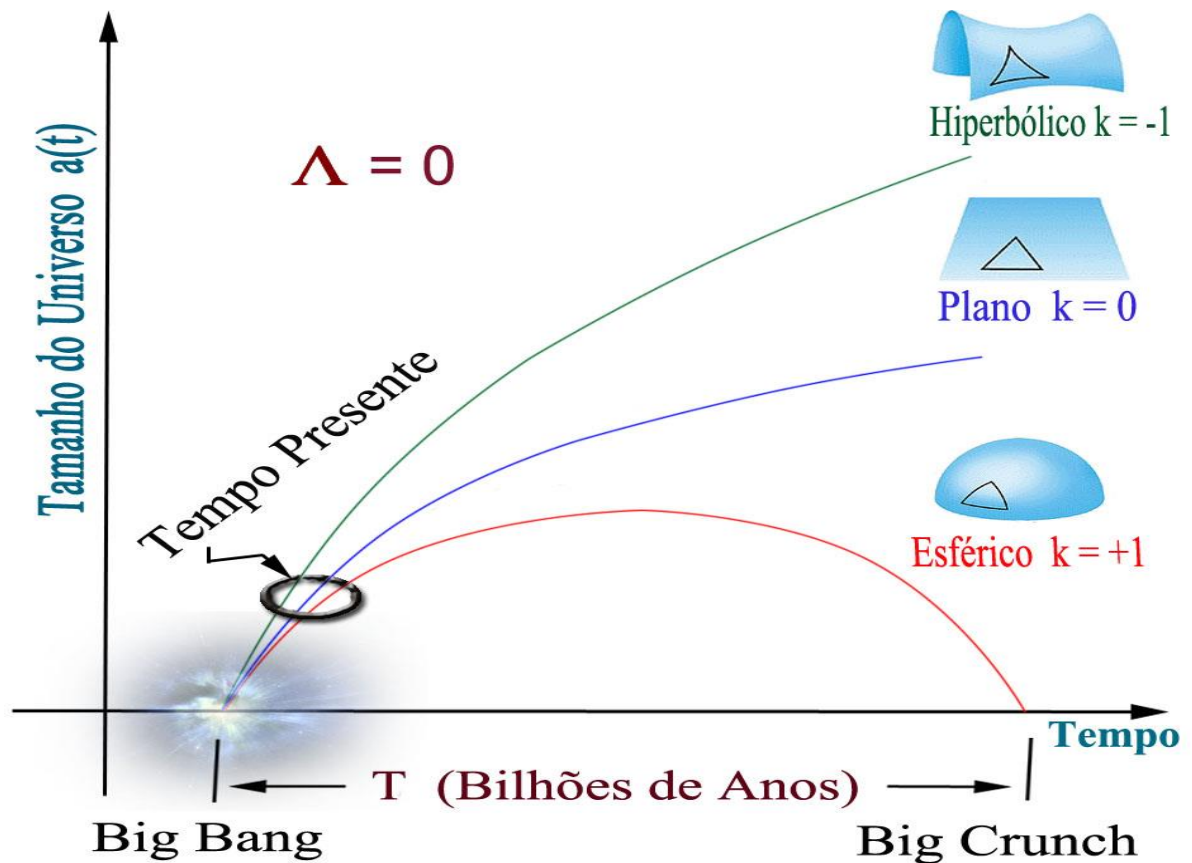
- **Curvatura**

$$\Omega_k = -\frac{K}{a^2 H^2} \quad (25)$$

Onde K é a constante de curvatura, se $K = +1$ o universo é esférico, se $K = 0$ temos um universo plano e se $K = -1$ o universo é hiperbólico (aberto). Para mais detalhes veja a figura 2; note que na abscissa temos o tempo em bilhões de anos e na ordenada o tamanho do universo, o tempo presente indicado na figura 2 é da ordem de 13,7 bilhões de anos (idade do universo, atualmente mais aceita pelos dados observacionais da cosmologia). A solução do caso plano ($k = 0$) foi determinada por Einstein e de Sitter em 1932.

A figura 2 ilustra o Parâmetro de curvatura

Figura 2- Parâmetro de curvatura



Fonte: Lima, J. A. S. & Santos, R. C. 2018

Figura 2: Parâmetro de curvatura. Essa é uma representação da Expansão do Universo em modelos do tipo Friedmann com $\Lambda = 0$, sendo (Λ) a Constante Cosmológica. Ao lado vemos os análogos em 2 dimensões das geometrias espaciais 3-dimensionais, homogêneas e isotrópicas (ilustração publicada na referência (LIMA, 2018).

- **Energia Escura**

Resultados de observações de supernovas feitas por (PERLMUTTER, 1999) (RIESS, 1998) não deixam dúvidas quanto ao fato de que hoje o universo se encontra em expansão acelerada. Com isso, uma nova componente desconhecida



precisou ser incorporada ao modelo padrão. Essa componente, chamada de energia escura é responsável por cerca de 70 % de todo o conteúdo de energia do universo.

Além disso, ela tem o efeito de se opor à gravidade em escalas cosmológicas, produzindo a expansão observada. Hoje as principais suposições para o que é a energia escura são: uma constante cosmológica introduzida nas equações de Einstein ou uma componente com lenta variação espaço-temporal (ARAUJO, 2005).

1.3 Modelo Λ CDM

O modelo Λ CDM (Constante Cosmológica Λ + matéria escura fria, com acrônimo em inglês CDM, Cold Dark Matter) considera um evento inicial, a partir de uma singularidade com densidade infinita que se expandiu exponencialmente (fator de expansão da ordem de 10^{27}) devido a um evento denominado de Inflação Cósmica.

Esse modelo cosmológico considera o Universo dominado por energia escura, matéria escura fria CDM não relativística e com uma contribuição de apenas, aproximadamente, 4,9% de matéria bariônica. Além disso, considera a constante cosmológica (Λ) o principal candidato pela expansão acelerada do Universo, interpretada também, como energia do vácuo.

Além das supernovas Ia, as observações astronômicas que dependem de algum modo da taxa de expansão parecem dar suporte à conclusão de que não vivemos mais num universo dominado por matéria e, portanto, desacelerado. Entretanto, a origem dessa aceleração permanece desconhecida. No contexto da TRG, a explicação mais simples é associá-la à densidade de energia do vácuo ou Constante Cosmológica (Λ), caracterizada pelo parâmetro constante da equação de estado, $w = p/\rho = -1$.

Colocando Λ na parte geométrica na equação de Einstein tem-se:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (26)$$

A partir dessa equação, a equação da aceleração, levando em consideração a constante cosmológica é dada por:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3} \quad (27)$$

O Modelo Λ CDM considera desprezível a densidade de energia da radiação $\Omega_{0,r} \approx 0$, frente à densidade de matéria e energia escura. Além do mais, considera o Universo com curvatura espacial nula ($k = 0$, $\Omega_{0,k} = 0$), como sugerem as observações da RCF (WMAP 9 anos). Portanto, para um Modelo Λ CDM Plano, tem-se que:

$$\Omega_{total} = 1 \rightarrow \Omega_{0,m} + \Omega_{0,\Lambda} = 1 \quad (28)$$

Logo,

$$E(\Omega_{0,m}; z) = \frac{H(z)}{H_0} = \sqrt{\Omega_{0,m}(1+z)^3 + (1-\Omega_{0,m})} \quad (29)$$

E o parâmetro atual de desaceleração q_0 , torna-se:

$$q_0 = \frac{3}{2}\Omega_{0,m} - 1 \quad (30)$$

O parâmetro normalizado de Hubble $E(z)$ é fundamental para limitar os parâmetros cosmológicos. Utilizando a modelagem mais adequada para cada situação de interesse e q_0 nos fornece o redshift de transição do universo desacelerado para o acelerado.

2. OSCILAÇÕES ACÚSTICAS DE BÁRIONS

Na fase inicial de evolução do Universo denominada de Era da Radiação, anterior a atual era da matéria, quando o campo de radiação era tão importante que dominava a taxa de expansão, todo o material estava completamente ionizado e a interação entre matéria e radiação era muito intensa gerando um forte acoplamento entre estes dois meios. Ao longo de toda essa época, a radiação e os bárions estão fortemente acoplados. O plasma quente e denso ($\rho \sim 10^{25} \text{ g/cm}^3$, $T \sim 10^{15} \text{ K}$ em $t \sim 10^{-8} \text{ s}$) passa por oscilações devido à competição entre a pressão de radiação e a instabilidade gravitacional produzida pelas flutuações na densidade acima da média. Os fótons interagem tão fortemente com a matéria bariônica que surgiam ondas de pressão, ou perturbações, fazendo este plasma bárion-fóton oscilar como ondas sonoras (PEEBLES e YU, 1970) (SUNYAEV e ZELDOVICH, 1970), daí o nome oscilações acústicas de bárions.

Conforme o universo expande e sua temperatura diminui, a energia dos fótons deixa de ser suficiente para ionizar os átomos. Então os átomos ionizados iniciam a captura dos elétrons formando átomos neutros. Essa é denominada era da Recombinação. A recombinação descreve o momento em que a densidade numérica de átomos neutros se iguala a densidade numérica dos íons. Após a recombinação, os bárions ficam livres da pressão dos fótons caindo no potencial gravitacional produzido pelas perturbações na matéria escura fria. As primeiras estruturas começaram a se formar e a perturbação do plasma se fixou na distribuição de matéria do universo. A distância em que estas ondas viajaram antes de se fixarem chama-se horizonte acústico (r_s).

O valor da escala acústica bariônica é calculado através do horizonte acústico no momento em que os bárions se desacoplam dos fótons, dada pelo redshift de arraste (drag) $z \equiv z_{drag}$ (EISENSTEIN e HU, 1998).

Essas ondulações estão impressas no espectro de potência da temperatura da radiação cósmica fundo em micro-ondas (RCFM). Uma série de picos acústicos foi medida com precisão pelo satélite WMAP. As posições e alturas relativas desses



picos podem ser usadas para restringir os valores dos parâmetros cosmológicos fundamentais, particularmente quando as medidas de RCFM são combinadas com as medidas do espectro de potência da galáxia (PERCIVAL, 2002) (TEGMARK, 2004).

A escala acústica dos bárions pode ser obtida através de um pico na função de correlação que está associado ao excesso de probabilidade de encontrar pares de galáxias separados por uma determinada distância. Essa escala característica é uma ferramenta de extrema importância para distinguir modelos cosmológicos (EISENSTEIN DJ, 1998).

As oscilações acústicas podem servir como régua padrão ao imprimirem uma escala característica na distribuição de galáxias.

BAO é provavelmente a régua padrão mais bem compreendida no universo para redshift moderado e, portanto, em conjunto com observações da CMB, ela oferece grande poder para restringir os parâmetros cosmológicos (PHILCOX, 2020).

2.1 A Física do BAO

As equações de Einstein acoplam gravitacionalmente todas as componentes do universo (matéria bariônica, matéria escura, fótons, neutrinos). Durante a inflação, as flutuações quânticas em pequenas escalas são perturbações na métrica de fundo. As perturbações na métrica podem ser decompostas em perturbações escalares, vetoriais e tensoriais. (BAUMANN, 2009) (MUKHANOV, 2005).

As perturbações, num regime linear, evoluem independentes umas das outras. As vetoriais decaem com a expansão do Universo, e, portanto, não apresentam traços observacionais relevantes (MUKHANOV, 2005). Já as perturbações tensoriais não influenciam nas perturbações de densidade. Assim, as perturbações que vão gerar as inhomogeneidades na densidade de energia, responsável pela formação das estruturas observadas em grandes escalas, são as perturbações escalares. O estudo da perturbação escalar é de extrema importância para compreendermos as características observadas no mapeamento das galáxias. Para esse estudo é preciso levar em conta a equação de Boltzmann relativística.

A equação de Boltzmann relativística devido ao acoplamento fóton-bárion e às flutuações do campo gravitacional é a seguinte:

$$\Theta_0'' + \frac{R_s}{1+R_s} H \Theta_0' + k^2 c_s^2 \Theta_0 = -\frac{K^2}{3} \Psi - \frac{R_s}{1+R_s} H \Phi' - \Phi'' \quad (31)$$

$$c_s^2 \equiv \frac{\delta p_\gamma}{\delta \rho_\gamma + \delta \rho_b} = \frac{1}{3(1+R_s)} \quad (32)$$

$$R_s \equiv \frac{3\rho_b}{4\rho_\gamma} = \frac{3\Omega_b^{(0)}}{4\Omega_\gamma^{(0)}} \frac{1}{1+z} \quad (33)$$

Considerando uma perturbação adiabática, temos que c_s é a velocidade do som efetiva do plasma acoplado de bárions e fótons. A razão R_s , escrita em termos do parâmetro de densidade da matéria $\Omega_b^{(0)}$ e da radiação $\Omega_\gamma^{(0)}$, no tempo atual, diz que quanto maior for o redshift z , maior será a velocidade acústica do fluido acoplado. Na última passagem assumimos que: $\delta p_\gamma = \frac{\delta \rho_\gamma}{3}$ e, como

$$\rho_b \propto a^{-3} \propto T^3 \text{ e } \rho_\gamma \propto a^{-4} \propto T^4, \text{ temos que: } \frac{\delta \rho_\gamma}{\rho_\gamma} = \frac{4}{3} \left(\frac{\delta \rho_b}{\rho_b} \right).$$

A relação entre as flutuações na temperatura da RCF, $\Theta_0 \approx \frac{\delta T}{T}$, e as flutuações na densidade dos bárions, δ_b , e dos fótons, δ_γ , é dada por:

$$\rho_b \propto a^{-3} \propto T^3 \rightarrow \delta_b = \frac{\delta \rho_b}{\rho_b} = \frac{3\delta T}{T} \approx 3\Theta_0$$

$$\rho_\gamma \propto a^{-4} \propto T^4 \rightarrow \delta_\gamma = \frac{\delta \rho_\gamma}{\rho_\gamma} = \frac{4\delta T}{T} \approx 4\Theta_0$$

Lembrando que na definição da velocidade acústica c_s estamos considerando uma perturbação adiabática, ou seja, as perturbações da entropia não contribuem para velocidade do som. Assim, os bárions e fótons fortemente acoplados

descrevem um fluido único, descrito em termos da sua densidade e velocidade. Uma maior concentração de bárions diminui a velocidade do fluido.

Fazendo $\delta_b = 3\Theta_0$ em (31), temos:

$$\delta_b'' + \frac{R_s}{1+R_s} H \delta_b' + k^2 c_s^2 \delta_b = -K^2 \Psi - 3 \frac{R_s}{1+R_s} H \Phi' - 3\Phi'' \quad (34)$$

Essa equação pode ser reescrita como um oscilador harmônico amortecido pela expansão que sofre uma força induzida pelos potenciais Φ e Ψ .

Definindo $D_{gb} \equiv \delta + 3\Phi$, temos:

$$D_{gb}'' + \frac{R_s}{1+R_s} H D_{gb}' + k^2 c_s^2 D_{gb} \equiv -K^2 \left[\Psi - \frac{R_s}{1+R_s} \Phi \right] \quad (35)$$

Ignorando a igualdade da direita (força induzida), a equação acima se comporta como um oscilador amortecido em virtude do seguinte termo associado à expansão:

$\left[\frac{R_s}{1+R_s} \right] H D_{gb}' \approx \left[\frac{R_s}{1+R_s} \right] H \frac{D_{gb}}{\eta^2}$. No limite $R_s \ll 1$, temos:

$$D_{gb} = D_{gb}^{homog} + k^2 \int_0^\eta (\Phi - \Psi) \frac{f_1(\tilde{\eta})f_2(\eta) - f_1(\eta)f_2(\tilde{\eta})}{f_1(\tilde{\eta})f_2'(\tilde{\eta}) - f_1'(\tilde{\eta})f_2(\tilde{\eta})} d\tilde{\eta} \quad (36)$$

Sendo $f_1 = \sin[k \int c_s d\eta]$ e $f_2 = \cos[k \int c_s d\eta]$, temos $D_{gb}^{homog} = c_1 f_1 + c_2 f_2$.

O valor do horizonte acústico r_s é calculado no tempo conforme η e define a escala da propagação da onda acústica,

$$r_s(z) = \int_0^\eta c_s d\tilde{\eta} = \int_0^a \frac{c_s d\tilde{a}}{\tilde{a}^2 H(\tilde{a})} = \int_z^\infty \frac{c_s dz}{H\tilde{z}} \quad (37)$$

Para compreender a natureza, amplitude e distribuição das flutuações, vamos relacionar as ferramentas estatísticas que são necessárias a esse entendimento.

2.1.1 Função de Correlação e Espectro de Potência

As ondas acústicas se formaram superpostas umas as outras, de forma que elas não são percebidas visivelmente. Os padrões são determinados através da análise estatística do espectro de potência e da função de correlação.

A função de correlação de dois pontos é um instrumento estatístico útil na análise cosmológica, pois possibilita a determinação do excesso de probabilidade de encontrarmos um par de galáxias, que em geral, não estão aleatoriamente distribuídas. Elas se encontram em grupos, aglomerados ou superaglomerados.

Suponha inicialmente que a distribuição de galáxias no espaço seja uniforme. Assim, se N for número médio de galáxias por unidade de volume, o número esperado de galáxias dentro de um volume V , a densidade média de pontos é dada por $\bar{\rho} = \frac{N}{V}$. Considerando dV como uma unidade de volume dentro do volume V , então $dP = \bar{\rho}dV$ é a probabilidade de encontrar um ponto nesta unidade de volume dV . A probabilidade de encontrar um ponto no volume dV_1 localizado em \vec{x}_1 e, simultaneamente, encontrar outro ponto \vec{x}_2 numa unidade de volume dV_2 vai depender da distribuição na amostra. Se os pontos estão aleatoriamente distribuídos a probabilidade dP_{12} conjunta é dada pelo produto das probabilidades individuais.

Para uma aglomeração dos pontos, é necessário introduzir a quantidade $\xi(\vec{x}_1, \vec{x}_2)$, que é a função de correlação entre estes pontos, tal que:

$$dP_{12} = (\bar{\rho}^2)[1 + \xi(\vec{x}_1, \vec{x}_2)]dV_1dV_2 \quad (38)$$

Para pontos descorrelacionados, $\xi(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = 0$. A função de correlação $\xi(\vec{x}_1, \vec{x}_2)$ demonstra o excesso de probabilidade de se localizar pontos separados a distância $\vec{r} = (\vec{x}_2 - \vec{x}_1)$, comparado a uma distribuição aleatória. Se $\xi(\vec{x}_1, \vec{x}_2) > 0$, vamos ter uma aglomeração de pontos e se $\xi(\vec{x}_1, \vec{x}_2) < 0$ haverá uma dispersão dos

pontos. Sejam os pontos definidos pelo perfil do excesso de densidade em determinadas regiões, temos que:

$$\langle \rho(\vec{x}_1)\rho(\vec{x}_2) \rangle = (\bar{\rho}^2) \langle [1 + \delta(\vec{x}_1)][1 + \delta(\vec{x}_2)] \rangle = \bar{\rho}^2 [1 + \xi(r)] \quad (39)$$

Onde $\xi(\vec{x}_1, \vec{x}_2) = \langle \delta(\vec{x}_1)\delta(\vec{x}_2) \rangle$ e $\langle \delta(\vec{x}) \rangle = 0$. O símbolo $\langle \rangle$ representa a média sobre uma distribuição que tem todas as propriedades estatísticas iguais. Existem duas maneiras de realizar a média fixando a distância \vec{r} entre os elementos de volume. A média pode ser obtida através de diferentes realizações para a distribuição de pontos, ou seja, podemos calcular a média do valor $\rho(\vec{x}_1)\rho(\vec{x}_2)$ de cada distribuição considerando diferentes amostras. Outra forma seria, uma vez que fixamos a distância entre dois elementos de volume, calcular $\rho(\vec{x}_1)\rho(\vec{x}_2)$ para cada par dentro da mesma amostra e tomar a média (CARVALHO, 2015).

Similarmente a uma gota caindo num poça d'água, o BAO formou ondas esféricas que se distanciaram do centro de perturbação da matéria escura. A distância percorrida pela onda esférica formada pela perturbação inicial é chamada de escala acústica.

Assim, podemos utilizar a correlação de distância entre os pares de galáxias para obter a escala acústica bariônica.

Para identificar a escala acústica na distribuição real de galáxias, precisamos comparar um catálogo aleatório com os dados. Os catálogos são distribuições de objetos gerados aleatoriamente (distribuição de Poisson) e os dados são as distribuições geradas com as simulações.

Para obter a função de correlação da distribuição de galáxias, em geral, utilizam-se estimadores. Existem diferentes estimadores:

- Peebles e Hauser (1974):

$$\xi(r) = \frac{n_r}{nd} \left(\frac{DD(r)}{RR(r)} - 1 \right) \quad (40)$$

- Davis e Peebles (1983):

$$\xi(r) = \frac{2n_r}{(nd-1)} \left(\frac{DD(r)}{RR(r)} - 1 \right) \quad (41)$$

- Hamilton (1993):

$$\xi(r) = \frac{4n_r nd}{(nd-1)(n_r-1)} \left(\frac{DD(r)RR(r)}{DR(r)DR(r)} - 1 \right) \quad (42)$$

- Landy e Szalay(1993):

$$\xi(r) = \frac{1}{RR} \left[DD \left(\frac{n_r}{nd} \right) - 2DR \left(\frac{n_r}{nd} \right) + RR \right] \quad (43)$$

Onde $DD_{(r)}$, $DR_{(r)}$ e $RR_{(r)}$ são os números de pares separados até (r) considerando os pares dados-dados, dados-catálogo e catálogo-catálogo respectivamente. Os parâmetros nd e n_r são os números de objetos nos dados e catálogos, respectivamente.

Entre esses estimadores citados, o de Landy e Szalay(1993) é o mais utilizado por ser superior em relação a precisão e estabilidade.

Além disso, estamos interessados em estudar a evolução temporal das perturbações, portanto é interessante estudarmos o espectro de potências e descrevê-lo no espaço de Fourier.

Dentro de um volume comóvel V , $\delta(\vec{x})$ é descrito da seguinte forma:

$$\delta(\vec{x}) = \frac{V}{(2\pi)^3} \int \delta_{\vec{k}} e^{-i\vec{k} \cdot \vec{x}} \quad (44)$$

Nas várias ondas de $\delta(\vec{x})$, temos em cada uma \vec{k} sendo o número de onda comóvel e $\lambda = 2\pi / \vec{k}$ o comprimento de onda comóvel. Conhecida cada

componente de Fourier, obtemos o espectro completo do campo de flutuações de densidade $\delta(\vec{r})$.

Cada componente de Fourier é um número complexo representado na forma:

$$\delta_{\vec{k}} = \left| \delta_{\vec{k}} \right| e^{i\phi_{\vec{k}}} \quad (45)$$

Onde $\phi_{\vec{k}}$ é o ângulo de fase. Para flutuações com $\left| \delta_{\vec{k}} \right| \approx 1$, as perturbações podem ser descritas por:

$$\ddot{\delta}_{\vec{k}} + \frac{2\dot{a}}{a} \dot{\delta}_{\vec{k}} = 4\pi G \bar{\rho} \delta_{\vec{k}} \quad (46)$$

Isto significa que a teoria de perturbação linear, no estudo de estruturas em grandes escalas, pode ser usada mesmo se as perturbações não forem muito pequenas. O espectro de potência $P(k)$ é definido pela amplitude quadrática média das componentes de Fourier:

$$P(k) = \left\langle \left| \delta_{\vec{k}} \right|^2 \right\rangle \quad (47)$$

A Inflação gerou flutuações de densidade constituindo um campo gaussiano, além de homogêneo e isotrópico. Assim, para um dado δ num ponto aleatório tem-se uma distribuição de probabilidade gaussiana na forma:

$$p(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (48)$$

Assim, o espectro de potência $P(k)$ e a função de correlação de dois pontos $\xi(r)$ estão correlacionados por uma transformada de Fourier:

$$P(k) = 4\pi \int_0^\infty r^2 \frac{\sin(kr)}{kr} \xi(r) dr \quad (49)$$

2.2 BAO e a Energia Escura

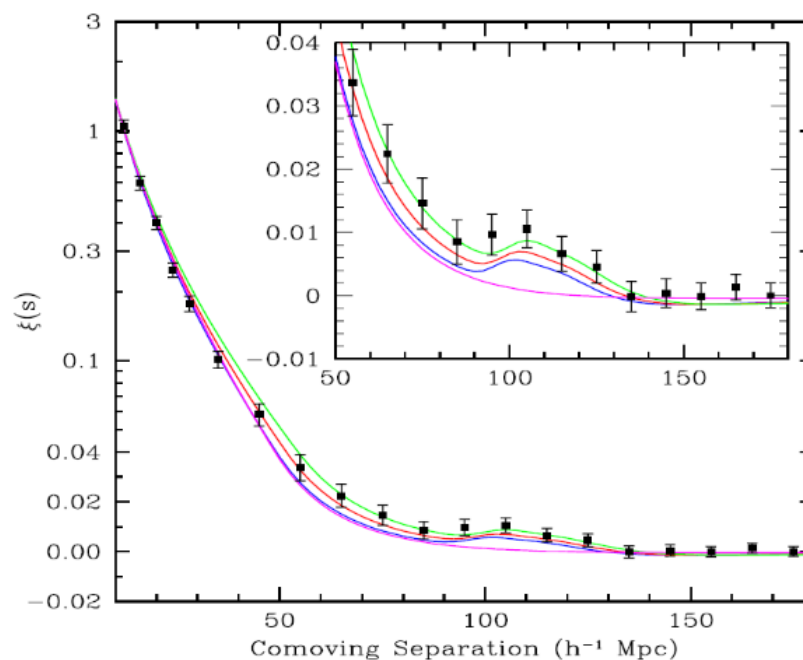
O cálculo das distâncias cósmicas é uma ferramenta de extrema importância nas estimativas dos parâmetros cosmológicos.

A primeira medida do horizonte acústico em distribuição de galáxias em larga escala foi feita pelo Sloan Digital Sky Survey (SDSS) (EISENSTEIN, 2005) e 2dF Galaxy Redshift Survey (2dFGRS) (ANDERSON, 2013) com desvio para o vermelho, com uma amostra de 46.748 galáxias vermelhas luminosas, com redshift de 0,16 a 0,47, varrendo 3.816 graus quadrados.

A função de correlação em larga escala que SDSS (EISENSTEIN, 2005) desenvolveu, mostra um pico bem detectado numa separação de $100h^{-1}\text{Mpc}$.

A figura 3 ilustra a função de correlação de galáxias.

Figura 3- Função de correlação de galáxias



Fonte: Ilustração obtida de (EISENSTEIN, 2005).

Figura 3: Função de correlação obtida utilizando 46.748 galáxias mapeadas pelo SDSS sobre um volume de 4 bilhões de anos-luz. As diferentes curvas correspondem aos modelos com $\Omega_m h^2 = 0,12$ (verde); $0,13$ (vermelho); $0,14$ (azul). A curva rosa corresponde ao modelo considerando somente matéria escura com $\Omega_m h^2 = 0,105$.

Isto implica que, dada uma galáxia formada em um pico de densidade, existe uma probabilidade maior de encontrarmos outra galáxia a uma distância de $100h^{-1}\text{Mpc}$, que por sua vez, é aproximadamente igual ao horizonte acústico na época da recombinação ($r_s \approx 150\text{Mpc}$), sendo um triunfo para o modelo cosmológico padrão.

2.3 Distâncias

A distância entre um observador e uma galáxia pode ser obtida utilizando a métrica FLRW, da seguinte forma:

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left\{ \frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right\} \quad (50)$$

Onde,

$$d\chi = \frac{dr}{\sqrt{1-kr^2}} \quad (51)$$

Um raio de luz viaja ao longo de geodésicas nulas $ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 d\chi^2 = 0$, onde θ e ϕ são constantes. A distância comóvel que um fóton percorreu do tempo de sua emissão t_e em $\chi = \chi_0$, ao tempo observado t_0 em $\chi = 0$, é:

$$D_c = \int_{t_e}^{t_0} \frac{cdt}{a} = \int_0^{\chi_0} d\chi = \int_0^r \frac{d\tilde{r}}{\sqrt{1-k\tilde{r}^2}} = \begin{cases} \arcsin(\sqrt{Kr}) \frac{1}{\sqrt{k}} & \text{se } k > 0 \\ r & \text{se } K = 0 \\ \operatorname{arcsinh}(\sqrt{Kr}) \frac{1}{\sqrt{k}} & \text{se } K < 0 \end{cases} \quad (52)$$

A distância comóvel também pode ser escrita como:

$$D_c = \int_{t_e}^{t_0} \frac{cdt}{a} = \int_{a_e}^{a_0} \frac{cda}{aH(a)} = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{E(\tilde{z})} \quad (53)$$

Onde $E(z)$ é o parâmetro de Hubble adimensional e $a_0 = a = 1+z$, dado por:

$$E(z) \equiv \frac{H(z)}{H_0} = \sqrt{\Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_x f(z)} \quad (54)$$

Ω_x é o parâmetro de densidade da energia escura e varia com:

$$f(z) = \exp \left[3 \int_0^z (1+w(z')) \frac{dz'}{1+z'} \right] \quad (55)$$

No modelo Λ CDM, onde $w(z) = -1$ e $\Omega_\Lambda = \Omega_x$ e $f(z) = 1$, podemos verificar a evolução da energia escura e de outros parâmetros cosmológicos utilizando a distância comóvel.

O horizonte acústico do BAO é uma escala característica observada tanto na distribuição CMB quanto nas galáxias. Se soubermos a extensão do objeto observado, podemos definir a distância de diâmetro angular $D_A(z)$ a partir da razão entre o tamanho próprio l do objeto e sua separação angular $\delta\theta \ll 1$,

$$D_A(z) \equiv \frac{l}{\delta\theta} = \frac{a D_c \delta\theta}{\delta\theta} = \frac{1}{1+z} D_c \quad (56)$$

Onde $\delta\theta$ é a separação angular medida pelo BAO na função de correlação de 2 pontos da distribuição de galáxias. Pode-se então converter esses valores medidos D_A e H em parâmetros cosmológicos, fornecendo informações sobre a natureza da energia escura.

$$D_A = \frac{1}{1+z} \int_0^z \frac{dz}{H(z)} \quad (57)$$

As correlações podem ser observadas tanto na direção radial (linha de visada) quanto nas direções perpendiculares à linha de visada das galáxias, portanto, o levantamento das galáxias é tridimensional, logo é definida uma distância híbrida que combina as direções radiais e transversais.

A direção transversal é dada por $r_\perp = (1+z)D_A$ e a direção radial associada ao parâmetro de Hubble é $r_\parallel = \frac{cz}{H(z)}$, ou seja,

$$D_V(z) \equiv (r_{\perp}^2 r_{\parallel})^{\frac{1}{3}} = \left[(1+z)^2 D_A^2(z) \frac{cz}{H(z)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (58)$$

A figura 4 ilustra as distâncias radial e transversal do BAO

Figura 4- Distância radial e transversal do BAO

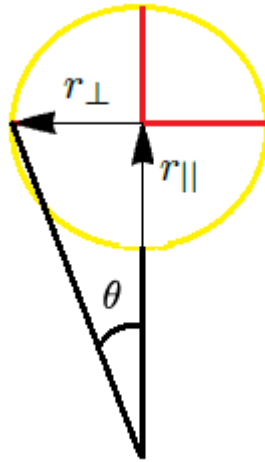


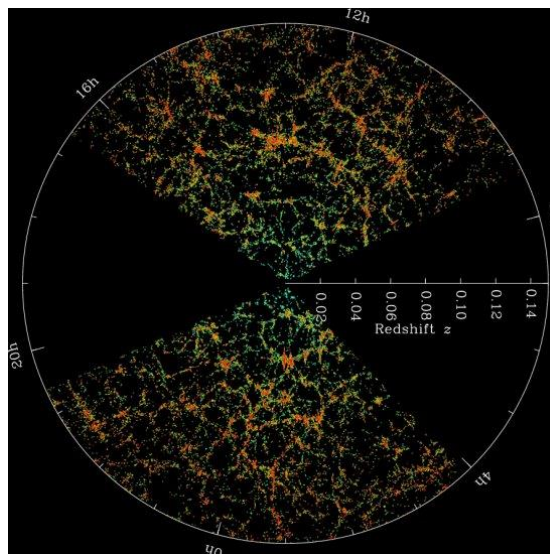
Figura 4: As duas contribuições da escala acústica: uma radial, r_{\parallel} relacionada ao parâmetro de Hubble e outra transversal, r_{\perp} relacionada à distância de diâmetro angular.

3. OBSERVAÇÕES

A estrutura em grande escala na distribuição de galáxias no universo representa uma das grandes descobertas da cosmologia moderna. Mapas tridimensionais a partir de pesquisas do desvio para o vermelho (redshift) traçam uma rica estrutura de aglomerados de galáxias conectadas em superaglomerados por filamentos e paredes e em torno de vazios interconectados, revelando estruturas de mais de 100 milhões de anos-luz de extensão. Estas estruturas contêm informações que podem ajudar a responder algumas das muitas questões da cosmologia, tais como, origem e composição da matéria e energia escuras, como essas estruturas se formaram, entre outras.

A Figura 5 ilustra estas estruturas.

Figura 5- O mapa do Universo do SDSS



Fonte: M. Blanton and the SDSS Galaxy Map (sdss3.org)

Figura 5: O mapa do Universo do SDSS mostrado como um diagrama de pizza. Cada ponto é uma galáxia; a cor indica a densidade local (com o vermelho revelando os lugares mais densos). Isso representa uma fatia do Universo, com a Terra no centro e as galáxias mais distantes da Terra plotadas mais longe do centro (a distância é marcada aqui como redshift). O ângulo ao redor da pizza é marcado pelas coordenadas do céu (Reta de Ascensão). Fonte: sdss3.org.



O principal processo que permite a construção de grandes levantamentos de galáxias tridimensionais do universo local é a expansão cósmica, que foi descoberta cerca de 100 anos atrás, quando em 1929, Hubble encontrou evidências de que a velocidade aumenta linearmente com a distância das galáxias. Medir distâncias de galáxias diretamente é muito difícil já que os telescópios são incapazes de identificar estrelas individuais em todas as galáxias, exceto nas mais próximas. Mas medir a velocidade de recessão de uma galáxia é relativamente simples. Um telescópio equipado com um espectrógrafo pode medir o espectro da luz emitida por uma galáxia e determinar seu redshift a partir da mudança do comprimento de onda padrão das linhas de emissão e outras características espectrais. As pesquisas realizadas utilizando o SDSS-I e 2dFGRS obtiveram os desvios para o vermelho de mais de um milhão de galáxias, gerando catálogos bidimensionais das posições angulares dessas galáxias no céu numa distribuição tridimensional de galáxias usando o redshift como coordenada radial.

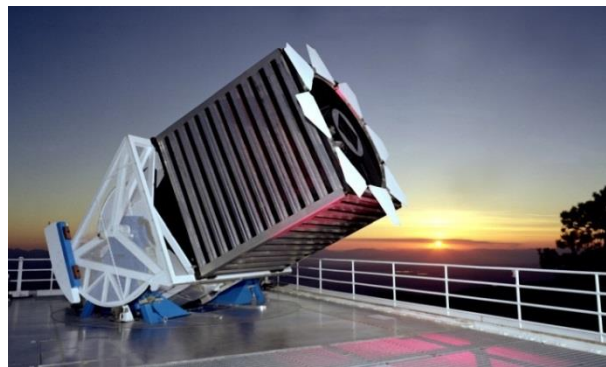
The Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

O projeto SDSS começou em 1990 com o objetivo de fazer o maior mapeamento do universo jamais visto e simultaneamente alavancar a revolução nos detectores digitais. Usando um Telescópio de 2,5 m de amplo campo de observação, no Observatório Apache Point, o SDSS mapeou o céu usando uma câmera digital de campo amplo, a maior do tipo na época, capaz de produzir imagens profundas e amplas do céu em 5 cores. Com esta câmera, o SDSS fotografou um terço do céu, detectando mais de 200 milhões de galáxias e 250 milhões de estrelas. Usou também um espectrógrafo multifibras, que podia captar espectros de 640 objetos concomitantemente, em um campo de 3 graus de diâmetro. Ambos os instrumentos tiveram um rendimento muito alto que, combinado com o amplo campo de visão do telescópio, conseguiram mapear o céu em um taxa sem precedentes. Em 2009, o SDSS obteve espectros de mais de 1,5 milhões de objetos, incluindo quase um milhão de galáxias e quasares.

Mas, além do volume de dados, a verdadeira revolução do SDSS foi a natureza digital e o levantamento sistemático e uniforme dos dados, o que permitiu um processamento de imagens e de espectros excepcionalmente versátil e bem caracterizado. Os dados completos, de imagens brutas a catálogos de ciência, foram lançados para a comunidade astronômica mundial, e os dados públicos em uma série de bancos de dados.

A Figura 6 ilustra o Observatório Apache Point do SDSS.

Figura 6- Observatório Apache Point do SDSS



Fonte: sloan.org

Figura 6: O Sloan Foundation Telescope, no qual o SDSS foi executado. O telescópio de 2,5 m no Observatório Apache Point a 9200 pés de altitude no Novo México, US, é notável pelo seu amplo campo de visão, 3 graus de diâmetro. Ao contrário de muitos telescópios, ele não fica em uma cúpula, mas é protegido do vento por um defletor envolvente (as ripas visíveis aqui) que se move com o telescópio. Oito pétalas na parte superior do defletor pode ser dobrada na visão do telescópio para fornecer uma tela contra a qual projetar a luz das lâmpadas de calibração. Não visto aqui é o galpão que protege o telescópio da chuva, neve e sol. Fonte: sloan.org.

A detecção das Oscilações Acústicas de Bárions (BAO) na distribuição em larga escala de galáxias é uma etapa importante na determinação da composição do universo e outras medições. Com o BAO pode-se obter medições mais precisas das propriedades da energia escura.



Em janeiro de 2005, as equipes SDSS e 2dF anunciaram em conjunto a detecção de BAO na sua análise de agrupamento de galáxias. Os catálogos de galáxias 2dFGRS e SDSS-I tridimensionais são os pontos de partida necessários para análise e extração dos sinais de BAO. Essas foram as primeiras investigações que cobriram um volume do espaço suficientemente grande para viabilizar a detecção do BAO.

A análise 2dFGRS envolveu essencialmente a modelagem das propriedades de galáxias e critérios de seleção da pesquisa, a fim de prever como as galáxias estavam distribuídas no espaço. Isso então permitiu definir a densidade excessiva de galáxias em função da posição no levantamento e uso de técnicas de Fourier para calcular o espectro de flutuações de densidade de galáxias em escalas muito grandes. Na realidade, a maior parte do trabalho envolvido era testar as suposições feitas na modelagem e calibrar a pesquisa para assegurar que erros sistemáticos não influenciassem indevidamente a medição.

Na análise SDSS-I, foi usada uma maneira mais direta de detectar a escala de comprimento dos sinais de BAO. Calculou-se como uma função de separação a função de correlação das flutuações na densidade das galáxias (SZALAY, MATSUBARA e LANDY, 1998). Nesta estatística, os sinais de BAO esperados estão num único pico numa distância de $100h^{-1}\text{Mpc}$ (500 milhões de anos-luz). Esta morfologia pode ser entendida da seguinte forma: uma região deixada superdensa pela inflação será superdensa de matéria escura, mas também irá gerar uma onda de som que viaja para fora da região inicial. Esta onda viaja 500 milhões de anos-luz antes de parar na recombinação, criando uma pequena densidade excessiva de gás naquele raio. Tanto a superdensidade inicial como o eco a 500 milhões de anos-luz favorecem as condições para a formação de galáxias. Quando se analisa o mapa completo, as galáxias têm uma probabilidade ligeiramente maior de serem separadas por 500 milhões de anos-luz do que por 400 ou 600 milhões de anos-luz.

Essas medições confirmaram fortemente todo o modelo de formação das estruturas e restringiu a fração bariônica da matéria em aproximadamente 18%. A detecção do BAO fornece uma conexão clara entre a estrutura vista nas anisotropias da radiação cósmica de fundo de micro-ondas 400.000 anos após a inflação e isso visto num agrupamento de galáxias 10 bilhões de anos depois.



SDSS-II (2000-2008)

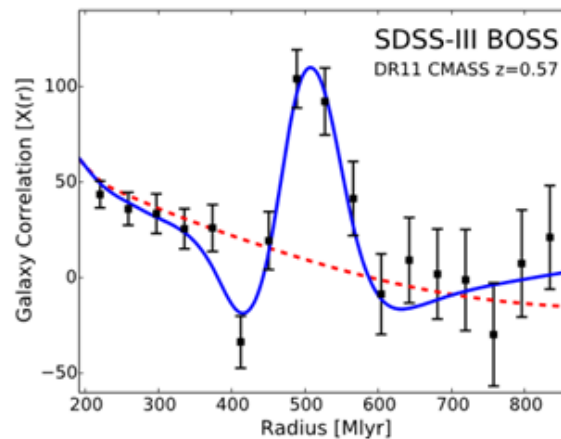
Em seus primeiros cinco anos de operação, o SDSS realizou imagens multicoloridas profundas em mais de 8.000 graus quadrados (20% do céu) e mediu espectros de mais de 700.000 objetos celestes. Com uma colaboração cada vez maior, o SDSS-II (2005-2008) completou os objetivos originais da pesquisa de imagem da metade do céu ao norte e mapeamento do agrupamento tridimensional de um milhão de galáxias e 100.000 quasares. O SDSS-II realizou dois levantamentos adicionais: o Supernova Survey, que descobriu e monitorou centenas de supernovas para medir a história de expansão do universo, e o Sloan Extension for Galactic Under Exploration (SEGUE), que estendeu a imagem do SDSS para o plano de galáxia e mapeou os movimentos e a composição de mais de um quarto de milhão de estrelas da Via Láctea.

SDSS-III (2008-2014)

Uma terceira fase colaborativa, o SDSS-III, teve início em 2008. O Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) foi o maior programa do SDSS-III e produziu um novo mapa espectroscópico do universo, cobrindo 25% do céu, incluindo alvos com um fator de luminosidade 10 vezes mais fraco do que o SDSS original. Os mapas finais do BOSS incluíram quase 2 milhões de galáxias e quasares e forneceu uma visão da estrutura em grande escala do universo, 7 vezes mais poderosa do que o SDSS anterior. Em 2012, a análise dos primeiros 35% do conjunto de dados produziu medições da distância do diâmetro angular D_A com uma precisão de 1,7% da distância para um redshift $z = 0,57$.

A figura 7 ilustra a função de correlação do SDSS-III BOSS.

Figura 7- Função de correlação do SDSS-III BOSS



Fonte: Ilustração obtida de (ANDERSON, 2013).

Figura 7: A função de correlação do SDSS-III BOSS, mostrando uma detecção forte do pico acústico. Nesta figura, a estatística da função de correlação foi ajustada para que todas as barras de erro sejam independentes umas das outras. A linha tracejada vermelha mostra o modelo sem BAO; a linha azul é o modelo BAO mais adequado. A significância estatística resultante do pico acústico é de cerca de 8σ , uma detecção inconfundível. Esses dados resultam em uma medição de 1,0% da distância para o redshift 0,57 e fornecem uma medição crítica de nosso modelo cosmológico (ANDERSON, 2013).

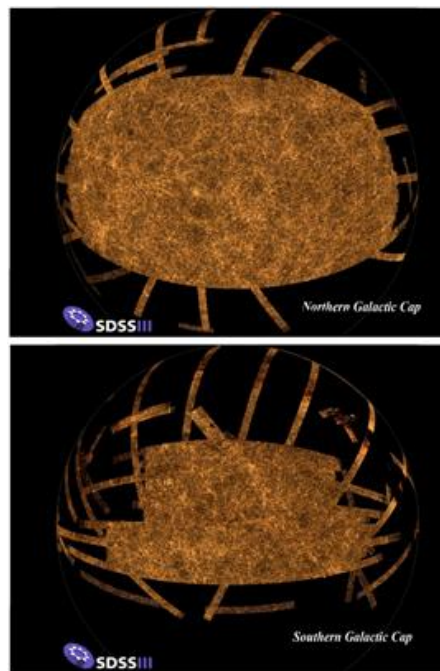
Em 2014, a análise de 85% dos dados finais melhorou aquele resultado para medições da distância do diâmetro angular D_A com uma precisão de 1,0% da distância para um redshift $z = 0,57$, a distância extragaláctica mais precisa já medida até então. Outros dados do BOSS produziram uma detecção do BAO no agrupamento do meio intergaláctico no redshift $z = 2,3$, rendendo uma medição de 3% da escala de distância nesta época muito anterior no Universo.

A combinação dos dados BOSS (ALAM, 2017) e os dados de anisotropia CMB com o satélite Planck forneceu uma medição convincente do modelo cosmológico, baseado predominantemente na utilização dessas ondas sonoras do início do Universo. Os dados apoiam fortemente a previsão inflacionária de um Universo espacialmente plano, bem como o modelo simples da energia escura como uma constante cosmológica. Combinado com dados da supernova Tipo Ia alcançou-

se medições da densidade cósmica e da constante de Hubble com incertezas de cerca de 2%.

A figura 8 ilustra os resultados do levantamento do SDSS-III.

Figura 8- Mapa do céu visto pelo SDSS-III



Fonte: Michael Blanton e SDSS-III.

Figura 8: Um mapa de todo o céu, derivado da imagem do SDSS-III, é dividido nos hemisférios norte e sul da nossa galáxia, a Via Láctea. Visíveis no mapa estão os aglomerados e paredes de galáxias que são as maiores estruturas em todo o universo. (Michael Blanton e SDSS-III.)

O SDSS-III inclui colaboração de mais de 800 cientistas e mais de 50 universidades e institutos pesquisas em todo o mundo.

SDSS-IV (2014-2020)

Com a conclusão bem-sucedida do SDSS-III, uma quarta fase colaborativa, SDSS-IV, começou no verão de 2014. O SDSS-IV tem novos objetivos que se baseiam nos resultados científicos das pesquisas anteriores do SDSS nas áreas de arqueologia galáctica, evolução de galáxias e cosmologia. Ao fazer isso, as



observações do SDSS-IV permitem o estudo astrofísico detalhado de estrelas e sistemas estelares, o meio interestelar e intergaláctico e buracos negros supermassivos. Os objetivos principais do SDSS-IV são alcançados nos três programas principais: *APOGEE-2*, *MaNGA* e o *eBOSS*, dois dos quais exigiam nova infraestrutura. É notável ver o sucesso contínuo de uma das lições principais de 2dF e SDSS: que foi uma colaboração de diversos cientistas em se buscar muitos objetivos simultaneamente por meio de um levantamento sistemático e coordenado do céu.

A última geração do SDSS (SDSS-IV, 2014-2020) está estendendo as medições cosmológicas de precisão para uma fase inicial crítica da história cósmica (*eBOSS*), expandindo seu levantamento espectroscópico de infravermelho nos hemisférios norte e sul (*APOGEE-2*), e pela primeira vez usando os espectrógrafos Sloan para fazer mapas espacialmente resolvidos de galáxias individuais (*MaNGA*). Dois levantamentos menores serão executados como subprogramas do *eBOSS*: o *Time Domain Spectroscopic Survey* (*TDSS*) será o primeiro levantamento espectroscópico sistemático em larga escala de fontes variáveis no tempo; e o *Spectroscopic Identification of ERosita Sources* (*SPIDERS*) que fornecerá um censo exclusivo de buracos negros supermassivos e crescimento de estruturas em grande escala, investigando a natureza das fontes emissoras de raios-X, incluindo núcleos galácticos ativos e aglomerados de galáxias. Finalmente, a biblioteca estelar *MaNGA* (*MaStar*) fornecerá uma biblioteca estelar ótica cobrindo uma ampla gama de parâmetros estelares.

eBOSS (Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey)

O *eBOSS* concentra-se na observação de galáxias e quasares, em uma gama de distâncias (redshifts) atualmente deixada completamente inexplorada por outros mapas tridimensionais de estrutura em grande escala no Universo (*ALAM*, 2020). Para preencher essa lacuna, o *eBOSS* criou a pesquisa de maior volume do Universo até hoje.



A combinação de eBOSS com o SPIDERS, através de uma amostra de quasares selecionados por raios X, e o TDSS, através de uma amostra de Núcleos galácticos ativos (AGN) selecionada por variabilidade, criou uma janela única para a população total de quasares em todas as épocas para redshift $z = 3$.

Os Resultados do eBOSS, tais como as medições finais, uma série de estudos complementares e a interpretação cosmológica foram tornados públicos em 20 de julho de 2020. Os detalhes das medições BAO e Redshift Space Distortions (RSD) finais de todas as pesquisas do SDSS, incluindo os algoritmos de seleção de alvos, catálogos e medições de todas as pesquisas do SDSS, foram fornecidos para aqueles que desejam usar esses resultados em análises independentes.

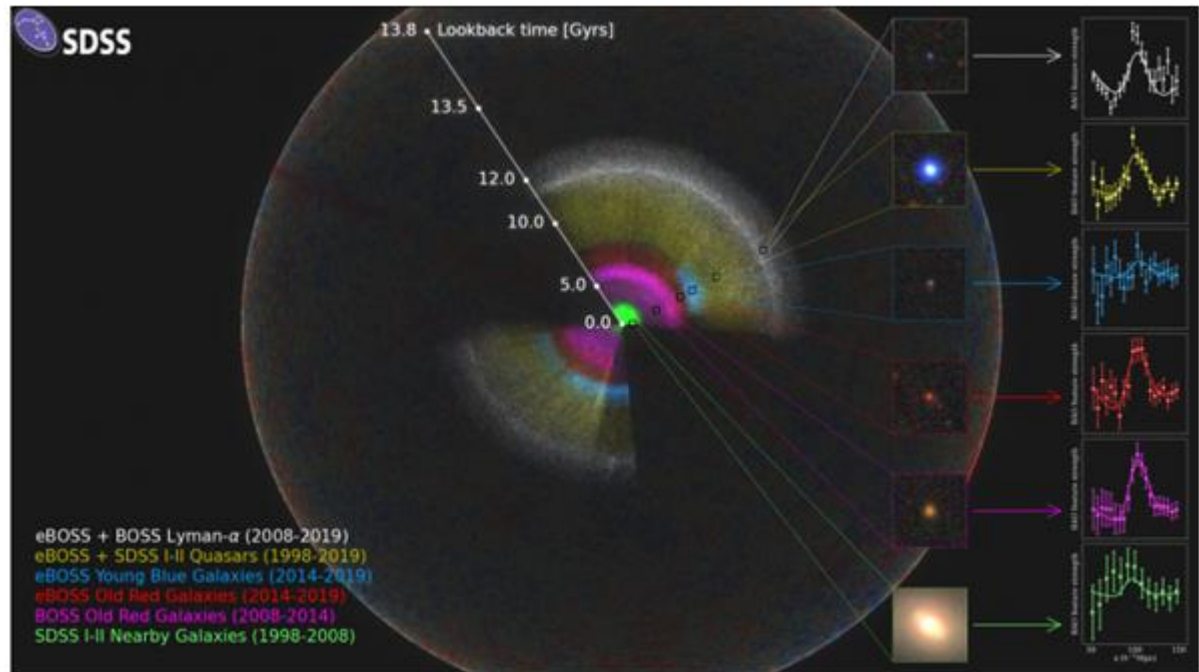
A análise cosmológica de BAO, RSD e outras sondas fornecem restrições de precisão de 1% no modelo cosmológico, com grandes avanços possibilitados pelos levantamentos de legado do SDSS.

Resumo do eBOSS:

- Comprimento de onda: 360-1000nm, resolução $R \sim 2000$
- 300.000 galáxias vermelhas luminosas com mais de 6.000 graus quadrados, com $0,6 < z < 1,0$.
- 175.000 galáxias de linha de emissão em 1.000 graus quadrados, com $0,6 < z < 1,1$.
- 500.000 quasares com mais de 6.000 graus quadrados, com $0,8 < z < 3,5$.
- medições de distância de 1–2% das oscilações acústicas bárions entre $0,6 < z < 2,5$.

A figura 9 ilustra o mapeamento do eBOSS e a distribuição de galáxias e quasares.

Figura 9- Mapeamento do eBOSS



Fonte: Anand Raichoor (EPFL) e BAO and RSD Results – Data Release 16

Figura 9: Mapa tridimensional de galáxias e quasares observados ao longo de quatro gerações de espectroscopia SDSS. (Fonte: sdss.org/science/final-bao-and-rsd-measurements/)

DES (Dark Energy Survey) (2012-2019)

Instalado no Telescópio Blanco de 4m (Fig. 10), localizado no Cerro Tololo Interamerican Observatory, Chile. As observações começaram no segundo semestre de 2012 e utilizaram 512 noites de telescópio durante os cinco anos de coleta de dados.

A figura 10 ilustra o Telescópio Blanco.

Figura 10- Telescópio Blanco no Chile



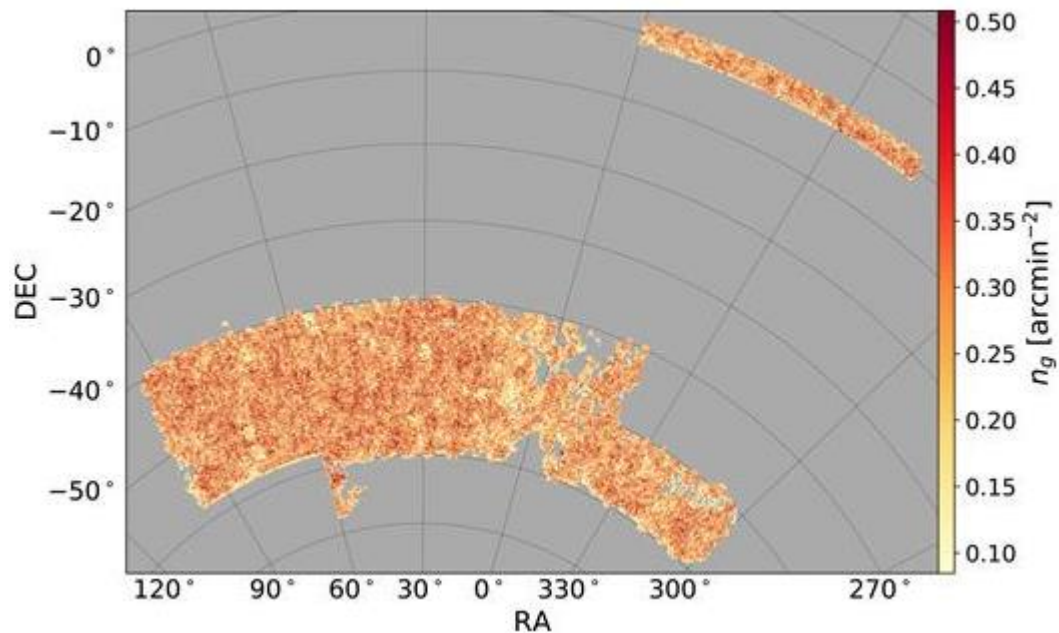
Fonte: Fermilab Visual Media Services

Figura 10: Vista do Telescópio Blanco (centro) à noite.

Os primeiros resultados foram publicados em 2017 (DES Y1), onde uma amostra de 1,3 milhão de galáxias extraídas de dados do Dark Energy Survey, otimizado para medir BAO na presença de incertezas significativas de redshift. A amostra é dominada por galáxias vermelhas luminosas localizadas em redshifts $z > 0,6$. Levantamentos espectroscópios de larga escala são de difícil realização. É possível, porém, obter redshifts por fotometria, isto é, utilizando imagens dos objetos com diferentes filtros, que permitem a passagem de luz apenas dentro de uma faixa de comprimentos de onda. Assim, é possível obter estimativas do redshift, que neste caso é chamado redshift fotométrico (ou photo-z, de forma abreviada). A seleção exata usando cortes de cor e magnitude que equilibram a necessidade de altas densidades numéricas e pequenas incertezas fotométricas de redshift, usando o erro de distância BAO previsto correspondente como uma figura de mérito no processo. A incerteza típica de photo-z varia de 2,3% a 3,6% (em unidades de $1 + z$) de $z = 0,6$ a 1, com densidades que variam de 200 a 130 galáxias por graus quadrados em caixas tomográficas de largura $\Delta z = 0,1$.

A figura 11 ilustra a distribuição angular e densidade projetada da amostra da galáxia vermelha DES-Y1

Figura 11- Ilustração Distribuição angular e densidade projetada da amostra da galáxia vermelha DES-Y1



Fonte: Ilustração obtida de arXiv:1712.06211

Figura 11: Distribuição angular e densidade projetada da amostra da galáxia vermelha DES-Y1, usada para medições BAO. Compreendem as duas maiores regiões compactas do conjunto de dados: uma no hemisfério sul de 1203 graus quadrados, observações SPT sobrepostas e 115 graus quadrados, perto do equador celestial, sobrepondo-se a S82. A amostra consiste em cerca de 1,3 milhão de galáxias com redshifts fotométricos no intervalo $[0,6-1,0]$ e constitui a linha de base para a nossa análise BAO DES-Y1. (arXiv:1712.06211)

LSST (Large Synoptic Survey Telescope)

O Large Synoptic Survey Telescope (LSST) será um telescópio de 8,4 metros capaz de mapear todo o céu visível. Será construído no norte do Chile (Fig.12) e está previsto para entrar em operação no ano de 2022.

O LSST irá obter redshifts fotométricos para 4 bilhões de galáxias com o pico de distribuição em torno de $z = 1$ e aproximadamente 10% das galáxias em $z > 2,5$. Ele alcançará o nível de precisão percentual na distância do diâmetro angular a 11

redshifts entre $z = 0,3$ a $3,6$, logaritmicamente espaçados com uma régua padrão calibrada por CMB e BAO no espectro de potência da galáxia (e matéria).

Oscilações acústicas bariônicas (BAOs) e Lenteamento fraco (WL, Weak Lens) são provas complementares da cosmologia. Uma análise conjunta de BAO e WL é muito mais poderosa do que qualquer uma das técnicas isoladamente, e as restrições resultantes na distância e no fator de crescimento são úteis para distinguir modelos de energia escura e de gravidade modificada.

A figura 12 ilustra o Large Synoptic Survey Telescope

Figura 12- Large Synoptic Survey Telescope



Fonte: (Wikipedia)

Figura 12: Progresso da construção do edifício do observatório LSST em Cerro Pachón em setembro de 2019.

O Brasil terá um grupo no LSST, denominado pela sigla em inglês BPG (Brazilian Participation Group).



DESI (Large Synoptic Survey Telescope) (2020-2025)

O DESI é um ambicioso espectrógrafo óptico multifibras localizado no telescópio Kitt Peak National Observatory Mayall de 4m (Fig.13), nos Estados Unidos. Irá obter espectros ópticos para dezenas de milhões de galáxias e quasares, construindo um mapa 3D que abrange o universo próximo a 11 bilhões de anos-luz. A pesquisa DESI será conduzida no telescópio Mayall de 4 metros no Observatório Nacional Kitt Peak.

O DESI usará 5.000 fibras ópticas para capturar luz de 5.000 objetos diferentes, principalmente galáxias, mas também quasares e algumas estrelas, embora o último seja principalmente para fins de calibração, a cada 20 minutos, medindo assim a distância de quase um milhão de galáxias a cada 30 noites de observação (AGHAMOUSA, 2016). DESI foi projetado para apontar automaticamente para conjuntos pré-selecionados de galáxias, reunir sua luz e, em seguida, usando dez espectrógrafos dividir essa luz em faixas estreitas de cores para mapear com precisão a distância dessas galáxias da Terra.

As 5000 fibras posicionadas roboticamente em um plano focal de 8 graus quadrados, alimentando um banco de 10 espectrógrafos de braço triplo que medem a passagem de banda completa de 360 nm a 980 nm em resolução espectral de 2000 no UV e mais de 4000 no vermelho e infravermelho (IR). Irá produzir a melhor medição de BAO realizando uma pesquisa espectroscópica em mais de 14.000 graus quadrados até redshifts de 3,5; 4 milhões de galáxias vermelhas luminosas (LRGs, 18 milhões de galáxias de linha de emissão (ELGs); 2,4 milhões de quasares (QSO), incluindo 0,7 milhões de quasares em $z > 2,2$ para floresta de Lyman-alfa; mais galáxias brilhantes para $z < 0,4$.

A figura 13 ilustra o Telescópio Kitt Peak National Observatory Mayall

Figura 13- Telescópio Kitt Peak National Observatory Mayall



Fonte: (<https://www.facebook.com/desisurvey/>)

Figura 13: Telescópio Kitt Peak National Observatory Mayall de 4m, nos Estados Unidos, que irá mapear o céu através do espectrógrafo óptico multifibras DESI. (<https://www.facebook.com/desisurvey/>)

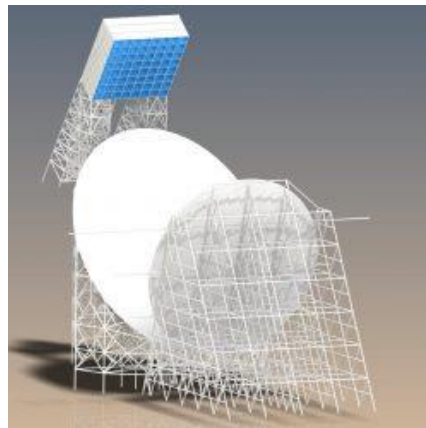
BINGO (BAO from Integrated Neutral Gas Observations)

O radiotelescópio BINGO (BAO in Integrated Neutral Gas Observations) (Fig.14) é um radiotelescópio projetado para fazer a primeira medição BAO na banda de rádio (~ 1 GHz). Ele usará uma técnica conhecida como Mapeamento de Intensidade (WUENSCH, 2019), baseada na transição hiperfina de Hidrogênio de 21 cm. O BINGO está atualmente em construção por um consórcio que inclui Brasil (USP e INPE). O telescópio será constituído por dois espelhos, onde o primário terá 40 metros, e o detector será composto por 50 cornetas em temperatura de ruído do sistema de ~ 50 K, na faixa de frequência de 0,96 GHz a 1,26 GHz com 512 canais. Esta faixa de frequência corresponde a um intervalo de redshift $z = 0,13 - 0,48$, portanto, muito depois da era da recombinação, uma época em que a energia escura começa a dominar o Universo. Será um telescópio estático, onde nenhuma peça é móvel. Rastreará uma região do céu de 15 graus x 200 graus, ao longo de anos, terá uma resolução de 40 minutos de arco na frequência do 1 GHz. Observará ao longo de 2 anos de forma a ser possível estimar a escala acústica com um nível

de incerteza de 2%, o que por sua vez permitirá estimar a equação do estado da energia escura w com 16% de nível de incerteza.

A figura 14 ilustra o protótipo do radiotelescópio BINGO

Figura 14- Protótipo do radiotelescópio BINGO



Fonte: (<https://www.bingotelescope.org/pt/>)

Figura 14: O radiotelescópio BINGO (BAO in Integrated Neutral Gas Observations) atualmente em construção por um consórcio que inclui Brasil (USP e INPE).



4. CONCLUSÃO

A estrutura em larga escala do Universo refere-se aos maiores sistemas gravitacionalmente ligados, os chamados aglomerados de galáxias. Essas estruturas são constituídas por 10^3 galáxias ou mais numa escala de 1-2 Mpc. É possível mostrar que numa escala maior do que 100 Mpc a distribuição dos aglomerados é aproximadamente homogênea e isotrópica. Os aglomerados foram se formando lentamente pela ação da gravidade quando o Universo entrou na era da matéria. Contudo, somente bilhões de anos depois da última superfície de espalhamento e que seu processo de formação entrou na fase não linear.

Por outro lado, devido a interação da matéria com a radiação, o estudo de galáxias e aglomerados fornece informações sobre o Universo primitivo, sendo também essencial para a compreensão do período dominado pela energia escura. Essas medições são obtidas a partir de estudos de imagem e espectroscopia de campo amplo no âmbito de pesquisas no espectro visível, infravermelho próximo, em rádio e também por lentes gravitacionais.

Como discutido no capítulo 1, a evolução do Universo em suas maiores escalas é controlada pelas equações de Friedmann, homogêneas e isotrópicas dentro do contexto da Teoria da Relatividade Geral. A aplicação das equações de Einstein ao Universo como um todo são soluções dinâmicas. Todas as observações astronômicas estão de acordo com um modelo espacialmente plano contendo matéria escura e energia escura. A constante cosmológica Λ é a melhor candidata de energia escura para explicar o presente estado de expansão acelerada conforme indicado pelas observações de supernovas do tipo Ia.

Certamente, a presença da constante cosmológica e da matéria escura no chamado modelo cosmológico padrão (**Λ CDM**) sinalizam que ainda temos desafios importantes na compreensão do cosmos envolvendo sua história e a natureza de suas componentes materiais. Embora sendo o modelo **Λ CDM** plano (curvatura espacial nula) descrito pela relatividade geral o que melhor descreve o universo observado, o mistério relacionado com a presença de 2 componentes desconhecidas, responsáveis por quase 96% do conteúdo material cósmico, pode estar sugerindo fortemente a busca por outras possibilidades.



No capítulo 2, apresentamos uma descrição da origem e os processos físicos de BAO e como podem funcionar como uma escala característica na estrutura da distribuição de galáxias. As relações de distância comóvel e distância de diâmetro angular restringem os modelos e parâmetros cosmológicos, permitindo descrever uma escala acústica.

Métodos estatísticos, como a função de correlação de dois pontos, servem para identificar a escala acústica, pois o padrão de oscilações não é facilmente visto, em razão do grande número de ondas acústicas.

Entretanto, o conceito de escala acústica bariônica exige uma análise conjunta com os dados da CMB, pois seu estudo fornece informações sobre o Universo primitivo por meio do CMB. Essas medições são obtidas a partir de estudos de imagem e espectroscopia de campo amplo no âmbito de pesquisas no espectro visível, infravermelho próximo e de rádio.

Como o BAO apresenta uma escala característica que permite a restrição dos modelos cosmológicos, muitos projetos têm como objetivo principal o mapeamento da estrutura em grande escala para obter o sinal do BAO. Sendo assim, no capítulo 3 apresentamos os principais levantamentos de galáxias em andamento e planejados que se apoiam nas informações do BAO para restringir parâmetros cosmológicos. Eles fornecerão informações significativas sobre a cosmologia e a formação e evolução das galáxias, como também, uma compreensão cada vez mais apurada da energia escura. No entanto, ainda será necessário alcançar um volume suficiente de dados para reduzir a variância cósmica da amostra e, ao mesmo tempo, minimizar o ruído e o erro na medida do redshift.

Vimos que os resultados obtidos com o BOSS são compatíveis com o modelo Λ CDM.

O DESI é um poderoso espectrômetro multi-objeto capaz de medir as posições e o redshift de dezenas de milhões de galáxias.

Em 2020, a Agência Espacial Europeia lançará a missão Euclid, que realizará uma pesquisa de deslocamento para o vermelho de galáxias na faixa de $0,9 < z < 1,8$ e simultaneamente pesquisará imagens nas bandas visíveis e próximas do infravermelho. A pesquisa completa irá gerar centenas de milhares de imagens e



várias dezenas de petabytes de dados. O Euclid observará cerca de 10 bilhões de fontes, das quais várias dezenas de milhões de redshifts serão determinados e usados para medições de agrupamento de galáxias.

O BINGO é um projeto inovador para medir BAO no intervalo de redshift entre $0,12 \leq z \leq 0,48$ em comprimentos de ondas de rádio. O sinal medido é produzido pela linha de 21 cm, desviado para o vermelho do hidrogênio neutro, por meio de uma técnica conhecida como mapeamento de intensidade. O BINGO fornecerá dados cosmológicos independentes e investigará o mesmo intervalo de redshifts que os levantamentos óticos BAO mais importantes, mas com sistemáticas diferentes.

Na era da cosmologia de precisão, os instrumentos utilizados como padrões de precisão estão cada vez mais fornecendo restrições poderosas sobre a energia escura e outros parâmetros cosmológicos. Nesse contexto, as oscilações acústicas de bárions são embasadas principalmente na física linear com não linearidades que podem ser bem modeladas e corrigidas. Ou seja, estruturas em pequena escala crescem não linearmente, as velocidades peculiares se comportam de forma diferente do previsto pela teoria linear e galáxias traçam a matéria escura de uma forma mais complexa. Esses efeitos modificam a localização das oscilações acústicas de bárions comparada à posição prevista pela teoria linear, distorcendo o valor de sua escala característica. Porém, como o pico acústico ocorre em grandes escalas, o mesmo é isolado do processo de formação de estruturas não lineares, e uma escala característica entre os pares de galáxias pode ser medida através de um pico na função de correlação de dois pontos.

Como resultado, a escala característica dessas "estruturas congeladas" impressas no plasma cósmico antes e durante o desacoplamento provavelmente permanecerá como um dos mais confiáveis padrões estatísticos para compreender a evolução do cosmos nos próximos anos.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGHAMOUSA, A. E. A. The DESI Experiment Part I: Science, Targeting, and Survey Design. **arXiv:1611.00036**, 2016.
- AKRAMI, Y. E. A. Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck. **arXiv:1807.06205**, 2018.
- ALAM, S. E. A. The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: cosmological analysis of the DR12 galaxy sample. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 470, Issue 3**, p. 2617-2652. **arXiv:1607.03155**, 2017.
- ALAM, S. E. A. The Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological Implications from two Decades of Spectroscopic Surveys at the Apache Point observatory. **arXiv:2007.08991**, 2020.
- ANDERSON, L. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Baryon Acoustic Oscillations in the Data Release 10 and 11 galaxy samples. **arXiv:1312.4877**, 2013.
- ARAUJO, J. C. N. The dark energy-dominated Universe. **Astropart.Phys.23**, p. 279-286. **arXiv:astro-ph/0503099**, 2005.
- ASTIER, P. E. A. The Supernova Legacy Survey: measurement of Ω_M , Ω_Λ and w from the first year data set. **Astronomy and Astrophysics**, p. 31-48, 2006.
- BAUMANN, D. TASI Lectures on Inflation. **arXiv:0907.5424**, 2009.
- BOND, J. R.; EFSTATHIOU, G. Cosmic background radiation anisotropies in universes dominated by nonbaryonic dark matter. **Astrophysical Journal, Part 2, 285**, 1984. L45-L48. 1984ApJ.285L.45B.
- CARVALHO, G. C. **Vínculos Cosmológicos Através da Estrutura em Grande Escala**. Observatório Nacional. Rio de Janeiro. 2015.
- COLE, S. The 2dF Galaxy Redshift Survey: Power-spectrum analysis of the final dataset and cosmological implications. **Mon.Not.Roy.Astron.Soc.362**, 2005. 505-534. **arXiv:astro-ph/0501174**.
- DE BERNARDIS, P. A Flat Universe from High-Resolution Maps of the Cosmic Microwave Background Radiation. **Nature, 404**, p. 955-959, 2000.
- DODELSON, S. **Modern Cosmology**. 1a. ed. [S.l.]: Academic Press, 2003.
- EISENSTEIN DJ, H. W. T. M. Cosmic Complementarity: H_0 and Ω_m from Combining CMB Experiments and Redshift Surveys. **Astrophys.J.504**, p. L57-L61. **arXiv:astro-ph/9805239**, 1998.



EISENSTEIN, D. J. Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies. **Astrophys.J.****633**, 2005. 560-574.

EISENSTEIN, D. J. E. A. Can Baryonic Features Produce the Observed 100h21Mpc Clustering? **The Astrophysical Journal**, **494**, 1998. L1-L4. astro-ph/9710303.

EISENSTEIN, D. J.; HU, W. Baryonic features in the matter transfer function. **Astrophys.J.**, **496**, p. 605. astro-ph/9709112, 1998.

FOLSING, A. **Albert Einstein a Biography**. New York: Viking, 1997.

HOLTZMAN, J. A. Microwave Background Anisotropies and Large-Scale Structure in Universes with Cold Dark Matter, Baryons, Radiation, and Massive and Massless Neutrinos. **Astrophysical Journal Supplement Series**, **71**, 1989. 1-24.

LIMA, J. A. S. A. S. R. C. 100 Anos da Cosmologia Relativística (1917–2017). Parte I: Das Origens à Descoberta da Expansão Universal (1929). **Revista Brasileira de Ensino Física.**, v. 40, 2018.

MUKHANOV, V. **Physical Foundations of Cosmology**. [S.l.]: Cambridge University Press , 2005.

PEEBLES, P. J. E.; YU, J. T. Primeval Adiabatic Perturbation in an Expanding Universe. **Astrophys.J.**, **162**, p. 815-836. 1970ApJ.162.815P, 1970.

PERCIVAL, W. J. E. A. Parameter constraints for flat cosmologies from CMB and 2dFGRS power spectra. **Mon.Not.Roy.Astron.Soc.****337**, p. 1068. arXiv:astro-ph/0206256, 2002.

PERLMUTTER, S. Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. **Astrophys.J.****517**, p. 565-586. arXiv:astro-ph/9812133, 1999.

PHILCOX, O. H. E. E. A. Combining Full-Shape and BAO Analyses of Galaxy Power Spectra: A 1.6% CMB-independent constraint on H0. **Journal of Cosmology and Astroparticle Physics**, p. arXiv:2002.04035, 2020.

RIESS, A. G. Observational Evidence from Super-novae to an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. **Astron.J.****116**, p. 1009-1038, 1998.

RIESS, A. G. Type Ia Supernova Discoveries at $z > 1$ From the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution. **Astrophys.J.****607**, 2004. 665-687.

SANTOS, R. C. **Efeitos das inhomogeneidades da matéria em Cosmologias Aceleradas**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 198. 2007.

SILK, J. Cosmic Black-Body Radiation and Galaxy Formation. **Astrophysical Journal**, **151**, 1968. 459.



SUNYAEV, R. A.; ZELDOVICH, Y. B. Small-Scale Fluctuations of Relic Radiation. **Astrophys.Space Sci.**, **7**, p. 3-19. 1970Ap&SS.7.3S, 1970.

SZALAY, A. S.; MATSUBARA, T.; LANDY, S. D. Redshift-Space Distortions of the Correlation Function in Wide-Angle Galaxy Surveys. **The Astrophysical Journal**, **Volume 498, Issue 1**, p. L1-L4. arXiv:astro-ph/9712007, 1998.

TEGMARK, M. E. A. Cosmological parameters from SDSS and WMAP. **Phys.Rev.D69:103501**, p. arXiv:astro-ph/0310723, 2004.

WEINBERG, S. **Cosmology**. 1a. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 2008.

WUENSCHÉ, C. A. Baryon acoustic oscillations from Integrated Neutral Gas Observations: Broadband corrugated horn construction and testing, p. arXiv:1911.13188, 2019.